北大版·高职高专土建系列规划教材



21世纪全国高职高专土建立体化系列规划教材

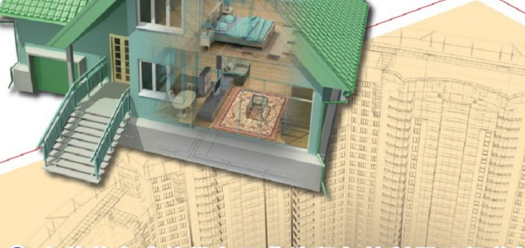


浙江省高校重点教材建设项目
浙江省示范实训基地支持教材

智能建筑环境设备自动化

ZHINENG JIANZHU HUANJING SHEBEI ZIDONGHUA

主 编 余志强



建筑设备

- 有效整合建筑设备工艺流程与控制原理相关知识
- 常见品牌设备和BAS工程应用案例贯穿相关章节
- 多种题型的习题全面检验读者学习成果





说　明

本书电子版仅提供给高校任课教师使用，如有任课教师需要本书课件或其他相关教学资料，请联系北京大学出版社客服，微信手机同号：15600139606，扫下面二维码可直接联系。

由于教材版权所限，仅限任课教师索取，谢谢！





21世纪全国高职高专土建立体化系列规划教材
浙江省高校重点教材建设项目
浙江省示范实训基地支持教材

智能建筑环境设备自动化

主　编　余志强
副主编　姜　浩　刘光平



内 容 简 介

本书从建筑设备自动化系统(BAS)的应用出发，理论联系实际，参阅国家部委最新颁发的标准文件，系统地阐述了BAS的基础知识和主要设备，给排水、暖通空调、变配电、电梯等机电系统的工艺流程和控制原理等内容。通过对本书的学习，读者可以掌握建筑设备自动化的基本原理，具备自行编制BAS初步设计文件的能力。

为便于学习和查阅，本书将建筑设备的工艺流程与控制原理相结合，对跨专业的知识进行有力整合。本书采用全新体例编写，将市场上常见的品牌设备和BAS工程应用案例穿插在相关章节中，增加了知识链接、特别提示及引例等模块，并附有多种题型的习题供读者自我检测和复习。

本书既可作为高职高专院校建筑设备类专业及电气自动化专业的教材和指导书，也可作为从事楼宇智能化工程、智能楼宇管理等领域相关人员的参考书或培训教材。

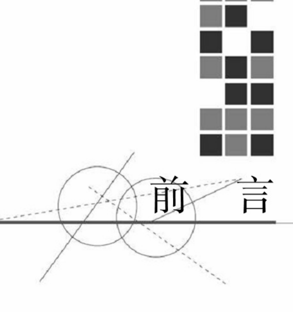
图书在版编目(CIP)数据

智能建筑环境设备自动化/余志强主编．—北京：北京大学出版社，2012.8
(21世纪全国高职高专土建立体化系列规划教材)
ISBN 978-7-301-21090-1

Ⅰ.①智… Ⅱ.①余… Ⅲ.①智能化建筑--自动化设备—高等职业教育—教材 Ⅳ.①TU85

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第187079号

书　　名：**智能建筑环境设备自动化**
著作责任者：余志强　主编
策划编辑：赖　青　王红樱
责任编辑：王红樱
标准书号：ISBN 978-7-301-21090-1/TU·0254
出　版　者：北京大学出版社
地　　址：北京市海淀区成府路205号　100871
网　　址：http://www.pup.cn　http://www.pup6.cn
电　　话：邮购部62752015　发行部62750672　编辑部62750667　出版部62754962
电子邮箱：pup_6@163.com
印　刷　者：
发　行　者：北京大学出版社
经　销　者：新华书店
787毫米×1092毫米　16开本　21印张　489千字
2012年8月第1版　2012年8月第1次印刷
定　　价：40.00元



前　言

本书为“21世纪全国高职高专土建立体化系列规划教材”之一，为适应21世纪职业技术教育发展的需要，培养智能建筑行业具备建筑设备自动化知识和技能的专业技术应用型人才，结合当前建筑设备自动化系统发展的前沿问题编写了本书。

本书内容共分7章，主要包括建筑设备自动化系统工程认知、建筑设备自动化系统的主要硬件设备、给排水系统的控制、空调系统的控制、冷热源系统的控制、其他建筑设备的控制和BAS系统集成。此外，为便于读者学习，本书将建筑设备的工艺流程与控制原理相结合，将市场上常见的品牌设备和BAS工程应用案例穿插在相关章节中，增加了知识链接、特别提示及引例等模块。

本书突破已有相关教材的知识框架，注重理论与实践相结合，采用全新体例编写，内容丰富，案例翔实，并附有多种题型的习题供读者选用。

本书既可作为高职高专院校建筑设备类专业及电气自动化专业的教材和指导书，也可作为从事楼宇智能化工程、智能楼宇管理等领域相关人员的参考书或培训教材。

本书内容可按照56～102学时安排，推荐学时分配：第1章8～12学时，第2章8～18学时，第3章8～16学时，第4章12～22学时，第5章10～20学时，第6章6～10学时，第7章4学时。教师可根据不同的专业灵活安排学时，课堂重点讲解每章的主要知识模块，章节中的知识链接、应用案例和习题等模块可安排学生课后阅读和练习。如专业已经设置了“建筑设备”、“自动控制技术”课程，则第2章中自动控制的内容和第3章～第6章中的受控设备工艺流程的内容可以略过，而选学其他内容。对于BAS的安装调试施工、投标设计等专题实践性项目，可作为实训内容另行安排。

本书由浙江工商职业技术学院余志强担任主编，浙江工商职业技术学院姜浩和南京铁道职业技术学院苏州校区刘光平担任副主编，全书由余志强负责统稿。本书具体章节编写分工为：余志强编写第1章、第2章、第4章和第5章；姜浩编写第3章和第7章；刘光平编写第6章。浙江中控集团、宁波建筑设计院等单位的专家，以及本校的同事对本书的编写工作提供了很大的支持与帮助，在此一并表示感谢！

本书在编写过程中，参考和引用了国内外大量文献资料，在此谨向有关作者表示衷心感谢。由于编者水平有限，书中难免存在不足和疏漏之处，敬请各位读者批评指正。

编者

2012年4月

目　录



第1章 建筑设备自动化系统工程认知

教学目标

通过了解智能建筑、建筑环境和建筑设备自动化系统的基本知识，初步认知智能建筑和建筑设备自动化系统的定义、功能作用、架构与组成和工程实施流程，为本课程的总体把握和后继章节的深入学习奠定基础。

教学步骤

能力目标	知识要点	权重	自测分数
掌握智能建筑的定义、组成和要素	智能建筑的各种定义	7%	
	3A系统	3%	
	智能建筑的设计要素	5%	
	建筑设备自动化系统与智能建筑的关系	3%	
了解智能建筑环境	智能建筑环境的总体要求	2%	
	智能建筑对物理环境、光环境、电磁环境、空气质量的具体要求	3%	
掌握建筑设备监控系统的定义、组成、功能和适用范围	广义的BAS与狭义的BAS	3%	
	BAS的发展历史	3%	
	BAS的监控内容与功能	7%	
	BAS的结构与组成	10%	
	BAS的软件平台	5%	
	BAS的操作	3%	

续表

能力目标	知识要点	权重	自测分数
了解建筑设备自动化系统的工程实施流程	BAS的设计依据	3%	
	BAS设计的深度要求及内容	7%	
	BAS的系统选型	5%	
	DDC控制器的设置原则	7%	
	BAS控制室的设置原则	7%	
	BAS的线路敷设方法	7%	
	BAS的供电与接地	5%	
	BAS的造价估算	5%	

▶▶章节导读

看到本书的书名和本章的标题，读者会问，智能建筑是什么？简单地说，智能建筑是指安装建筑设备自动化系统(简称为BAS)和其他建筑智能化系统的建筑。读者可以从1.1节了解智能建筑的定义、组成和设计要素。

读者会接着问，建造智能建筑和BAS的目的是什么呢？其实，智能建筑就是以满足人们对环保、节能和健康的需求为目的，向人们提供舒适、高效、便利的、适宜工作和生活的建筑环境。这也是给建筑装备BAS的目的。因此，读者有必要了解智能建筑环境的基本知识和要求。那么，建筑环境指的是什么呢？这可以从1.2节中获得思路。

接下来，读者就要想，BAS是怎么回事呢？BAS是智能建筑系统的一个重要系统，泛指基于计算机的楼宇控制系统。读者可以通过学习1.3节，了解BAS的定义、监控范围、功能、硬件架构、软件平台和基本操作等内容，建立起对BAS的初步的整体性的认识。

在初识BAS的总体概况后，读者会问，BAS在工程上是如何实施的？1.4节介绍了BAS的设计流程，以及BAS的设计依据、设计深度、系统选型、线路敷设、供电与接地、造价估算等内容。通过对1.4节的学习，读者将对BAS的工程实施过程了然于胸。

1.5节是对一个实际工程项目的认识参观。读者也可以亲自访问一个当地的工程项目。

通过本章的概述性介绍，读者将可以从整体上认知对智能建筑和建筑设备自动化系统，从而把握本书的主旨内容，并为后继章节的深入学习奠定基础。

引例

1984年1月，美国康涅狄格州哈特福德市(Hartford，Connecticut，USA)将一幢旧金融大厦进行改建。该大楼有38层，总建筑面积10万多m^2，出租率很低。该大楼住户之一的联合技术建筑系统公司(United Technologies Building System Co.，UTBS)承包了该大楼的空调、电梯及防灾设备等工程，采用综合布线技术和计算机网络技术对大楼的空调、电梯、照明设备进行监控，首次实现了大厦内的自动化综合管理。该大厦改建后，被命名为“都市办公大楼”(City Place Building)，如图1.1所示。

改建不仅为大厦内的用户提供语言、文字、数据、电子邮件和资料检索等信息服务，而且使用户感到舒适、方便和安全。对用户而言，最明显而吸引人的效益，是住户不必自购，而是以分租方式获得昂贵设备的使用权，既节省空间又节省人事费用。这些都大受大厦内办公用户的欢迎。因此，租金虽提高20%，大楼的出租率反而大为提高。

当初改建时，设计者与投资者并未意识到，这是形成“智能大厦”的创举，然而这正是世界上公认的第一幢智能建筑。

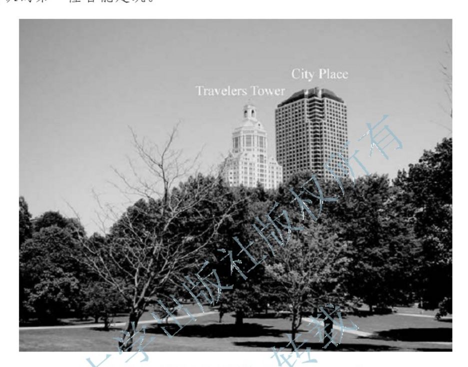


图 1.1 都市办公大楼(City Place Building)


案例小结

对大楼的空调、电梯、照明设备进行监控，实现大厦内的自动化综合管理，使用户感到舒适、方便和安全。尽管增加了初始投资，但后续的经济效益显著，体现了智能建筑的价值。

1.1 智能建筑认知

为适应现代社会信息化与经济国际化的需要，智能建筑在世界各地不断崛起，是现代化城市的重要标志。智能建筑在美、日、欧及世界各地蓬勃发展，已经成为21世纪建筑发展主流之势。我国智能建筑起步于20世纪90年代，发展速度之快以及所取得的成就令世人瞩目。

1.1.1 智能建筑的各种定义

智能建筑(Intelligent Building，IB)，也称为智能大厦，是当代高新科技和建筑技术结合的产物。智能建筑是随着计算机技术、通信技术和现代控制技术的发展和相互渗透而

发展起来的，并将继续发展下去。因此，智能建筑本身是一个动态的概念。

国际上对智能建筑比较认同的一种定义是：所谓智能建筑，就是通过对建筑物的4个基本要素(结构、系统、服务、管理)以及它们之间的内在联系，以最优化的设计，提供一个既投资合理又拥有高效率的优雅舒适、便利快捷、高度安全的环境空间。

我国对于智能建筑的定义，强调智能建筑是多学科、多技术系统综合集成的特点。认为：智能建筑是指利用系统集成方法，将3C技术(Computer，计算机技术；Control，控制技术；Communication，通信技术)与建筑艺术(Architecture)有机结合，通过对设备的自动监控、对信息资源的管理和对使用者的信息服务及其与建筑的优化组合，所获得的投资合理、适合信息社会需要并且具有安全、高效、舒适、便利和灵活特点的建筑物。该定义可以简单地表示为：3C＋A→IB。

目前，国际上各组织对智能建筑定义的表述尚未统一。下面所列的是其他表述，供读者参考。

(1) 美国智能建筑学会(American Intelligent Building Institute，AIBI)定义为：智能建筑是对建筑结构、建筑设备(机电系统)、供应和服务、管理水平这四个基本要素进行最优化组合，为用户提供一个高效率并具有经济效益的环境。

(2) 日本智能建筑研究会认为，智能建筑应提供包括商业支持功能、通信支持功能等在内的高度通信服务，并能通过高度自动化的大楼管理体系保证舒适的环境和安全，以提高工作效率。

(3) 欧洲智能建筑集团认为，智能建筑是使其用户发挥最高效率，同时又以最低的保养成本、最有效地管理本身资源的建筑，能够提供一个反应快、效率高和有支持力的环境以使用户达到其业务目标。

特别提示

尽管各个组织对智能建筑的定义有不同的文字表述，但其内涵是基本一致的，都以实现高效、舒适、便捷、安全的建筑环境空间为目的。

知识链接

我国现行的国家标准规范对智能建筑的描述

(1)《智能建筑设计标准》(GB/T 50314—2006)第2.0.1款对智能建筑的描述。

“2.0.1 智能建筑(IB) intelligent building 以建筑物为平台，兼备信息设施系统、信息化应用系统、建筑设备管理系统、公共安全系统等，集结构、系统、服务、管理及其优化组合为一体，向人们提供安全、高效、便捷、节能、环保、健康的建筑环境。”

(2)《智能建筑工程质量验收规范》(GB 50339—2003)第3.1.2款对智能建筑的描述。

“3.1.2 智能建筑分部工程应包括通信网络系统、信息网络系统、建筑设备监控系统、火灾自动报警及消防联动系统、安全防范系统、综合布线系统。智能化系统集成、电源与接地、环境和住宅(小区)智能化等子分部工程；子分部工程又分为若干个分项工程(子系统)。”

1.1.2 智能建筑 3A 系统

智能建筑由三大基本要素有机结合，构筑于建筑物环境平台之上的。这三大基本要素即 3A 系统，是指 BAS(Building Automation System，建筑设备自动化系统)、CAS(Communication Automation System，通信网络自动化系统)、OAS(Office Automation System，办公自动化系统)，如图 1.2 所示。为实施 3A 系统，需借助 PDS(Premises Distribution System，综合布线系统)。PDS 在建筑物内组成标准、灵活、开放的信息传输通道，是智能建筑的“信息高速公路”，是构建智能建筑 3A 系统必备的基础设施。

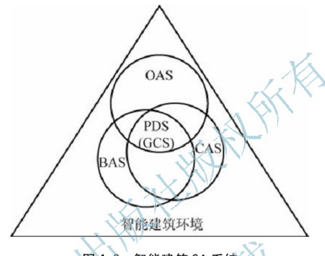


图 1.2 智能建筑 3A 系统

特别提示

对于智能建筑，除了上述的 3A 系统的提法，还有 5A 系统、7A 系统等多种提法。所谓的 5A 系统、7A 系统实际上是对 3A 系统的深化、细分和发展。从本质上来说，智能建筑本身是一个动态的概念，3A、5A、7A 等关于智能建筑的多种提法是统一的。

关于 5A 系统、7A 系统，请读者自行查阅资料，在此不做赘述。

1.1.3 智能建筑的设计要素

智能建筑以建筑物为平台，兼备信息设施系统、信息化应用系统、建筑设备管理系统、公共安全系统等，集结构、系统、服务、管理及其优化组合为一体，向人们提供安全、高效、便捷、节能、环保、健康的建筑环境。智能建筑的智能化系统工程设计宜由智能化集成系统、信息设施系统、信息化应用系统、建筑设备管理系统、公共安全系统、机房工程和建筑环境等设计要素构成。

(1) 智能化集成系统(Intelligented Integration System，IIS)。将不同功能的建筑智能化系统，通过统一的信息平台实现集成，以形成具有信息汇集、资源共享及优化管理等综合功能的系统。智能化集成系统构成宜包括智能化系统信息共享平台建设和信息化应用功能实施。

(2) 信息设施系统(Information Technology System Infrastructure，ITSI)。为确保建筑物与外部信息通信网的互联及信息畅通，对语音、数据、图像和多媒体等各类信息予以接收、交换、传输、存储、检索和显示等进行综合处理的多种类信息设备系统加以组合，提供实现建筑物业务及管理等应用功能的信息通信基础设施。信息设施系统宜包括通信接入系统、电话交换系统、信息网络系统、综合布线系统、室内移动通信覆盖系统、卫星通信系统、有线电视及卫星电视接收系统、广播系统、会议系统、信息导引及发布系统、时钟系统和其他相关的信息通信系统。

(3) 信息化应用系统(Information Technology Application System，ITAs)。以建筑物信息设施系统和建筑设备管理系统等为基础，为满足建筑物各类业务和管理功能的多种类信息设备与应用软件而组合的系统。信息化应用系统宜包括工作业务应用系统、物业运营管理系统、公共服务管理系统、公众信息服务系统、智能卡应用系统和信息网络安全管理系统等其他业务功能所需要的应用系统。

(4) 公共安全系统(Public Security System，PSS)。为维护公共安全，综合运用现代科学技术，以应对危害社会安全的各类突发事件而构建的技术防范系统或保障体系。公共安全系统宜包括火灾自动报警系统、安全技术防范系统和应急联动系统等。

(5) 建筑设备管理系统(Building Management System，BMS)。为实施综合管理，对建筑设备监控系统、火灾自动报警系统、安防自动化系统的集成。BMS 主要具有各子系统之间的协调、全局信息的管理以及全局事件的应急处理能力。其中，建筑设备监控系统也即建筑设备自动化系统，是本书的核心，后文将详细深入地介绍。

(6) 机房工程(Engineering of Electronic Equipment Plant，EEEP)。为提供智能化系统的设备和装置等安装条件，以确保各系统安全、稳定和可靠地运行与维护的建筑环境而实施的综合工程。机房工程范围宜包括信息中心设备机房、数字程控交换机系统设备机房、通信系统总配线设备机房、消防监控中心机房、安防监控中心机房、智能化系统设备总控室、通信接入系统设备机房、有线电视前端设备机房、弱电间(电信间)和应急指挥中心机房及其他智能化系统的设备机房。机房工程内容宜包括机房配电及照明系统、机房空调、机房电源、防静电地板、防雷接地系统、机房环境监控系统和机房气体灭火系统等。

(7) 建筑环境。参见 1.2 节。

特别提示

本小节所述的智能建筑设计要素的相关提法引自《智能建筑设计标准》(GB 50314—2006)，供读者参考。

1.2 智能建筑环境认知

人类生活的环境，从广义上讲，包括自然环境和人工环境。自然环境就是指自然界中原有的山川、河流、地形、地貌、植被及一切生物所构成的地域空间；而人工环境就是人

类改造自然界而形成的人为的地域空间。保持自然环境和人工环境的协调发展，是保证人类生存和发展的基本外部条件。

建筑环境为人工环境之一。建筑环境是指建筑内外的空间环境，其主要内容有建筑外环境、室内空气环境、建筑热湿环境、建筑声环境、建筑光环境等。其中，建筑热湿环境是建筑环境中的重要内容。应用智能建筑技术的目的就是要构筑舒适、高效的室内人工环境。

1. 智能建筑环境的总体要求

建筑物的整体环境应提供高效、便利的工作和生活环境，适应人们对舒适度的要求，满足人们对建筑的环保、节能和健康的需求，符合现行国家标准《公共建筑节能设计标准》(GB 50189—2005)有关的规定。

2. 建筑物的物理环境要求

(1) 建筑物内的空间应具有适应性、灵活性及空间的开敞性，各工作区的净高应不低于2.5m。

(2) 在信息系统线路较密集的楼层及区域宜采用铺设架空地板、网络地板或地面线槽等方式。

(3) 弱电间(电信间)应留有发展的空间。

(4) 应对室内装饰色彩进行合理组合。

(5) 应采取必要措施降低噪声和防止噪声扩散。

(6) 室内空调应符合环境舒适性要求，宜采取自动调节和控制。

3. 建筑物的光环境要求

(1) 应充分利用自然光源。

(2) 照明设计应符合现行国家标准《建筑照明设计标准》(GB 50034—2004)的有关规定。

4. 建筑物的电磁环境

建筑物的电磁环境应符合现行国家标准《环境电磁波卫生标准》(GB 9175—1988)有关的规定。

5. 建筑物内空气质量要求

建筑物内空气质量指标见表1-1。

表1-1 建筑物内空气质量指标

CO含量率/($\times10^{-6}$)	<10
CO_2含量率/($\times10^{-6}$)	<1000
温度/℃	冬天18～24，夏天22～28
湿度/%	冬天30～60，夏天40～65
气流/(m/s)	冬天<0.2，夏天<0.3

1.3 建筑设备自动化系统认知

1.3.1 BAS 的定义

建筑设备自动化系统(Building Automation System，BAS)就是将建筑物或建筑群内的变配电、照明、电梯、供热、通风、空调、给排水、消防、保安等众多分散设备的运行、安全状况、能源使用状况及节能管理实行集中监视、管理和分散控制的建筑物管理与控制系统。BAS 为用户提供一个既安全可靠、节约能源，又舒适宜人的工作或居住环境，是智能建筑系统的一个主要系统，是智能建筑实施的重点和难点。

在我国，通常将安全防范系统和火灾报警系统从 BAS 中分离出来，分别作为一个独立的系统进行设计和施工。因此，BAS 有广义和狭义之说。狭义的 BAS 的控制对象包括电力、照明、暖通空调、给水排水、电梯等设备。而广义的 BAS 包括狭义 BAS 和安全防范系统、火灾自动报警与消防联动控制系统，如图 1.3 所示。

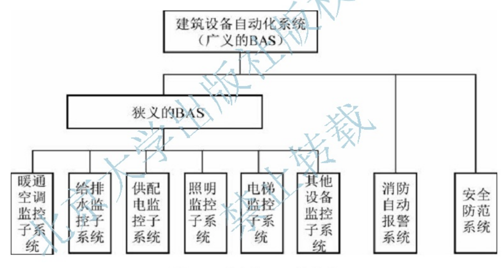


图 1.3 广义的 BAS 的构成

特别提示

在我国，安防、消防系统分别隶属于公安部门的安全技术防范管理办公室(技防办)和消防大队管理。因此，安全防范系统和火灾自动报警系统在行业内常常剥离于 BAS。

行业内所说的 BAS 一般指的是狭义的 BAS。狭义 BAS 有多种称法，如：建筑设备自动化系统、建筑设备监控系统、楼宇自动化系统、楼宇自控系统、楼控等。本书所讨论的即为狭义的 BAS。当工程有智能建筑集成要求时，狭义的 BAS 应提供与火灾自动报警系统及安全防范系统的通信接口，构成建筑设备管理系统(BMS)。

目前，BAS 不属于国家强制执行的标准范围。那么，应该如何设置 BAS 呢？一般来说，在实际工作中，应根据建筑物物业运行管理需要、各机电专业的监控要求，以及项目投资状况等实际需求来确定建筑物是否设置 BAS，以及 BAS 的设置范围、控制水平、产

品选择等。BAS的设置应以达到实际应用所要求的效果为目的，避免盲目投资。通常在建筑物规模较大、机电系统及设备较多、控制管理水平要求较高、采用建筑设备监控系统后节能效果较为显著的情况下应用。

1.3.2 BAS的发展历史

BAS发展史是一个从监控到管理的发展过程如图1.4所示。到目前为止，BAS已经历四个阶段。

(1) 第一代(20世纪70年代)产品。基于中央监控系统(Center Contorl and Monitoring System，CCMS)的BAS，如图1.4(a)所示。

BAS从仪表系统发展成计算机系统，采用计算机键盘和CRT构成中央站，打印机代替了记录仪表，分散设置于建筑物各处的信息采集站(Data Gathering Panel，DGP)通过总线与中央站连接在一起组成中央监控型自动化系统。DGP分站连接着传感器和执行器等设备，其功能只是上传现场设备信息，下达中央站的控制命令。一台中央计算机操纵着整个系统的工作。中央站采集各DGP分站信息，作出决策，完成全部设备的控制，中央站根据采集的信息和能量计测数据完成节能控制和调节。

(2) 第二代(20世纪80年代)产品。基于集散控制系统(Distributed Control System，DCS)的BAS，如图1.4(b)所示。

随着微处理机技术的发展和成本降低，DGP分站安装了CPU，发展成现场控制器。直接数字控制器(Direct Digital Controller，DDC)是现场控制器的典型形式。配有微处理机芯片的DDC分站，可以独立完成所有控制工作，具有完善的控制、显示功能，可以进行节能管理，并可以连接打印机、安装人机接口等。BAS由现场设备、DDC分站、中央站和管理系统组成。DCS的主要特点是只有中央站和分站两类结点，中央站完成监视，分站完全自治，独立完成控制，保证了系统的可靠性。

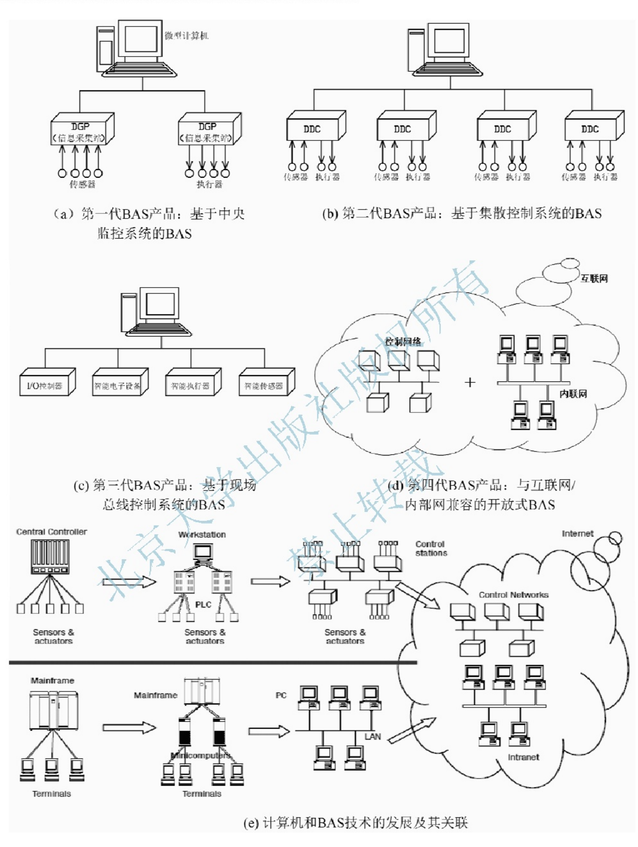
特别提示

DDC控制器实际上就是一台计算机。如MEC控制器由32位Power PC微处理器、64MB内存、8MB固件内存、32路输入输出通道和115.2Kbps通信接口等构成。

(3) 第三代(20世纪90年代)产品。基于现场总线控制系统(Fieldbus Control System，FCS)的BAS，如图1.4(c)所示。

随着现场总线技术的发展，DDC分站连接传感器、执行器的输入输出模块应用现场总线，从分站内部走向设备现场，形成分布式输入输出现场网络层，构成FCS。此时的传感器和执行器包含CPU，具有数据处理和通信功能，是智能型传感器和智能型执行器。

现场总线是现场智能化设备之间的数字式、双向传输、多结点和多分支结构的数字通信网络。DCS是把控制网络连接到现场控制器DDC，而FCS则是把通信网络一直连接到现场设备。FCS适应了控制系统向分散化、网络化、标准化和开放性发展的趋势，是继DCS之后的新一代控制系统。



(a) 第一代BAS产品：基于中央监控系统的BAS

(b) 第二代BAS产品：基于集散控制系统的BAS

(c) 第三代BAS产品：基于现场总线控制系统的BAS

(d) 第四代BAS产品：与互联网/内部网兼容的开放式BAS

(e) 计算机和BAS技术的发展及其关联

图 1.4　BAS 发展过程

(4) 第四代(21 世纪)产品。与互联网/内部网兼容的开放式 BAS，如图 1.4(d)所示。BAS 技术的演化过程实际上就是计算机和信息技术在楼宇控制与管理上的应用和发

展过程。在前三个阶段，BAS技术是以计算机技术为先导的，楼宇自动化系统和计算机系统/网络之间有清晰的界限。随着Internet/Intranet的发展，BAS在通信协议和信息处理的方法层面与计算机网络实现了兼容。许多计算机领域所使用的通信和软件技术被BAS直接采用。BAS采用Web技术，BAS中央站嵌入Web服务器，融合Web功能，以网页形式为工作模式，使BAS与计算机网络成为一体系统。从此，在BAS和计算机网络间就不再有界限了。无论系统在数量或空间上有多大的规模，系统间都可以方便地集成到一起。

特别提示

总结上述的BAS发展历程，可以发现计算机技术对BAS的巨大推动作用。如，DGP结合CPU，使之具备数据处理运算通信功能，成为可以独立完成所有现场控制工作的现场控制器。又如，传感器和执行器结合CPU，使之具备数据处理和通信功能，成为了智能型传感器和智能型执行器。

1.3.3 BAS的监控内容

BAS作为控制系统，必然有其相应的监测、控制与管理的对象。BAS监控的对象范围包括暖通空调系统、给水排水系统、电力系统、照明系统、电梯系统等。

1. 暖通空调系统

暖通空调系统是建筑物内功能最复杂、涉及设备最多、设备分布最分散和能耗最大的一个系统，是BAS的主要控制对象。需要监控的暖通空调设备有冷源系统(冷冻机组、冷冻水泵、冷却水泵、冷却塔)、热源系统(热水锅炉、热交换器、热水一次水泵)、空调机组(新风空调机组、新/回风空调机组、变风量空调)、送排风系统等。

2. 给水排水系统

智能建筑中的给水系统通常有水泵直接供水方式、高位水箱供水方式和气压罐压力供水方式等，而排水系统则先把污水集中于污水池，再用污水泵排出到室外排水管网。给水排水系统需要监控的设备主要有高位水箱、低位水箱、蓄水池、污水池、水泵、饮水设备、热水供应设备、生活水处理设备、污水处理设备等。

3. 供配电与照明系统

供配电系统为整幢建筑物各机电设施正常供电，保障整个建筑物的正常工作秩序，是智能建筑正常运行的先决条件。BAS可实现电力系统的继电保护与备用电源的自动投入，监视开关和变压器的状态，检测系统的电流、电压、有功功率与无功功率、电能等参数，实现全面能量管理等功能。

照明系统为人们的工作和生活提供必需的光环境，既要满足人体舒适感的要求，又要实现节能的目的。照明系统的监控范围包括楼层照明、泛光照明、障碍灯等。对于一般的建筑物，照明系统能耗比重很大，仅次于暖通空调系统。对照明系统实现智能控制对节能具有十分重要的意义。

4. 电梯系统

智能建筑中的运输系统主要有电梯、自动扶梯等，大多数为电梯群组。BAS可以监测电梯楼层的状况、电气参数，通过电梯群组的优化传送，控制平均设备使用率，并节约能源。

5. 其他系统

在工业建筑中，BAS可能还包括用于生产过程的压缩空气、蒸汽及热水系统等。

上述的建筑设备系统即为BAS的监控内容。一个BAS可能被用来监测、控制和管理这些设备系统的全部或部分。读者或许会接着问，BAS如何实现对这些建筑设备的监控呢？这正是后续章节的内容。

特别提示

一些初学者，往往认为“BAS由暖通空调系统、给水排水系统、电力系统、照明系统、电梯系统等组成”。有时，也会听到业内人士这样表述：“BAS子系统包括暖通空调系统、给水排水系统、电力系统、照明系统、电梯系统等。”其实，这两种提法是不严谨的也是不正确的。

确切地说，BAS是一种控制系统，而暖通空调系统、给水排水系统、电力系统、照明系统、电梯系统等建筑设备只是BAS的控制对象。在建筑工程中，BAS属于弱电专业(楼宇智能化工程)的范畴，而暖通空调系统、给水排水系统、电力系统、照明系统、电梯系统则是属于其他的专业范畴。

1.3.4 BAS的功能

建筑设备监控系统在智能建筑中的功能主要体现在以下4个方面。

1. 为建筑物提供良好环境

人们在建筑物内长时间工作和生活，对各机电设备系统提供的人工环境提出了更高的要求。BAS可以按照内部环境对各个机电设备的运行管理要求，自动控制建筑物的各种环境参数，如室内的温度、湿度、CO_2浓度等，使建筑物内部具有良好的工作、生活环境。

2. 优化建筑物内机电设备的运行管理与控制

BAS实现对分散在建筑物内的成千上万台机电设备、参数进行集中而实时的监测、自动控制、故障报警、运行时间统计、数据报表打印等管理，实现管理的科学化。

BAS的控制功能可以被分成两类：局部控制(或设备管理与控制)功能和监督控制(能源管理)功能。局部控制功能属于基本的控制与自动化，可以确保建筑设备系统运行正常和提供足够的服务。局部控制功能可以进一步被分成两组，包括时序控制和过程控制。时序控制决定设备开启和关停相关的顺序和条件。在建筑系统中典型的时序控制包括制冷剂时序控制、水泵时序控制、照明开关控制等。过程控制是根据过程变量和(或)干扰变量的测量值，即使在有干扰的情况下，通过调节控制变量来达到预定的过程目标。在建筑中所采用的最为普遍的反馈控制功能是比例积分微分(PID)控制。在建筑工程中，启停控制、步进控制和调制控制是局部过程控制环路的有效控制执行机制。

3. 能源管理与节能控制

建筑物经过投资、设计、施工、竣工交付后，即进入运营期。建筑物的生命期通常有60～80年，建筑建成后的运营成本主要来自于暖通空调、照明等机电设备所需的能耗与设备维修更新费用。目前，建筑能耗已占到我国社会总能耗的30%以上。可见，建筑能源消耗之巨大。

特别提示

有读者可能会说，把耗能设备关掉不用，不是又省电又省钱吗?

当然，恐怕没有比关掉耗能设备的办法更节能的了。然而，如果关掉设备(如空调、照明等)，则建筑环境就会恶化，进而影响工作和生活。因此，当需要某设备时，我们是不能把它关掉的。

作为工程技术人员，其目标应该是在不牺牲服务或室内环境质量的条件下来开停机或优化提高设备运行效率。

某大型公共建筑的建筑设备能耗比例如图1.5所示。暖通空调、水和照明等系统是该建筑的主要能耗。这些机电设备在BAS的控制下，可减少能源消耗，实现成本节约。根据有关资料，BAS在充分采用了优化控制技术措施和节能运行方式后，建筑物可以减少20%左右的能耗，3～5年就有可能收回BAS的投资。因此，可以让业主确信投资建设BAS是经济划算的。

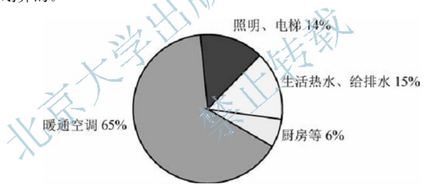


图1.5 某大型公共建筑的建筑设备能耗比例

BAS实现节能的途径可以在广义上分成两类：第一类是通过合理或优化开停机时间来实现节能；第二类是通过高效运行节能设备来实现节能，其典型的做法是把局部过程控制的设定值设定在合理或优化的范围内。

有两种高能效的途径来启动和停止设备运行，即“规划”和“优化”启停。在规划起停时，HVAC设备、照明设备等按照时钟和日历的组合进行启停。在优化启停程序时，BAS评估现有的运行工况，预测未来几个小时的工况并决策何时启停系统，以实现建筑在被使用期间以最小的能耗满足环境要求。

当考虑某些子系统或某个子系统的性能指标时，局部控制器的控制设置便可实现现代化和节能。监督控制，通常也被称为优化控制，是通过在允许的范围内系统地确定变量的控制值来使一个真实函数最大或最小化。以HVAC系统的控制为例，监督和优化控制的目的是考虑到不断变化的室内和室外条件，以及HVAC系统的特征，寻找最小的能耗输

入或运行费用，来满足室内舒适度和健康环境。与局部控制相比较，监督控制是从整体层面考虑的，包括系统层次特征和所有设备间及其相关变量间的相互作用。

特别提示

所有类型的建筑都可以装配某种节能系统以实现建筑节能。如果安装某个系统与节能相关，该系统被称为能源管理和控制系统(Energy Management and Control System，EMCS)或者建筑能源管理系统(Building Energy Management System，BEMS)。一般来讲，EMCS 或 BEMS 被认为是 BAS 的一部分。EMCS 或 BEMS 可以被认为是对建筑能耗有显著贡献的建筑设备系统中的监测和控制系统。

4. 提高工作人员效率，减少运行人员及费用

当今，维护建筑及其设备的人力成本占建筑运营总成本的比例相当可观。这是由于人工成本的增加和现代建筑设备系统复杂度的增加造成的。采用 BAS 后，由计算机系统对建筑物内的大量机电设备的运行状态进行集中监控和管理，对设备运行中出现的故障及时发现和处理，从而大量节省运行管理和设备维修人员，节省整个大楼的机电系统的运行管理和设备维护费用。因此，BAS 对建筑设备的集成与管理，可以提高工作效率，减少人工成本，这对于降低每年的建筑运营成本是一个很大的贡献。

1.3.5 BAS 的硬件架构

1. 概述

BAS 通常是由中央站、现场控制器、仪表和通信网络四个主要部分组成。BAS 一般采用分布式系统和多层次的网络结构。典型的 BAS 网络结构由管理、控制、现场设备三个网络层构成，如图 1.6 所示。管理网络层完成系统集中监控和各种系统的集成，控制网络层完成建筑设备的自动控制，现场设备网络层完成末端设备控制和现场仪表设备的信息采集和处理。三层之间的信息传输依靠通信网络系统来支持，同层内各装置之间由本层的通信网络进行联系。用于网络互联的通信接口设备根据各层不同情况，以 ISO/OSI 开放式系统互联模型为参照体系，合理选择中继器、网桥、路由器、网关等互联通信接口设备。

在实际工程中，BAS 可能在规模和网络配置上会有较大差异。根据系统的规模、功能要求及所选用产品的特点，BAS 可以有单层的、两层的或三层的网络结构。但不同网络结构的 BAS 均应满足分布式系统集中监视操作和分散采集控制的原则。对于大型 BAS，一般采用由管理、控制、现场设备三个网络层构成的三层网络结构。中型 BAS 一般采用两层或三层的网络结构，其中两层网络结构宜由管理层和现场设备层构成。小型 BAS 一般采用以现场设备层为骨干构成的单层网络结构或两层网络结构。

2. BAS 三层网络

1) 管理网络层(中央管理工作站)

管理网络层主要由服务器、工作站和通信接口等设备组成。当今，这一层次的设备通常基于 TCP/IP 通信协议，采用符合 IEEE 802.3 的以太网，可以提供非常高的通信速度。这个

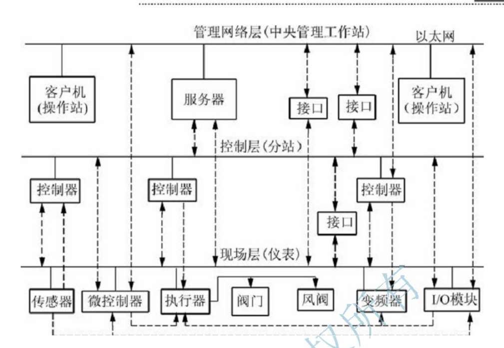


图 1.6　典型的 BAS 三层网络结构

层次所连接的中央管理工作站安装有监控管理软件，提供了中央管理和信息/数据存储功能，并为操作者提供操作平台和人机界面。管理网络层可与互联网(Internet)联网，提供互联网用户通信接口技术，用户可通过 Web 浏览器，查看 BAS 的各种数据或进行远程操作。

特别提示

中央管理工作站除了硬件部分外，还应包括软件部分。硬件部分包括计算机(普通办公或工业型微机)和外围设备(打印机、控制台等)。软件部分包括系统软件、图形显示组态软件和应用软件等。

管理网络层应具备的功能有：监控系统的运行参数；检测可控的子系统对控制命令的响应情况；显示和记录各种测量数据、运行状态、故障报警等信息；数据报表和打印。

服务器与工作站之间可采用客户机/服务器(Client/Server)或浏览器/服务器(Browser/ Server)的体系结构。当需要远程监控时，客户机/服务器的体系结构应支持 Web 服务器。服务器为客户机(操作站)提供数据库访问，并采集控制器、微控制器、传感器、执行器、阀门、风阀、变频器数据，采集过程历史数据，提供服务器配置数据，存储用户定义数据的应用信息结构，生成报警和事件记录、趋势图、报表，提供系统状态信息。

2）控制网络层(分站)

控制网络层由通信总线和控制器组成。BAS 通过通信网络系统将不同数目的现场控制器，与中央管理计算机连接起来，共同完成各种采集、控制、显示、操作和管理功能。

控制网络层可包括并行工作的多条通信总线，每条通信总线可通过网络通信接口与管理网络层(中央管理工作站)连接。通信总线的通信协议采用 TCP/IP、BACnet、LonTalk、MeterBus 和 ModBus 等国际标准。当控制器(分站)采用以太网通信接口而与管理网络层处于同一通信级别时，可采用交换式集线器连接，与中央管理工作站进行通信。控制器(分站)可与现场网络层的通信总线连接，并与现场设备通信。

控制器(分站)采用直接数字控制器(DDC)、可编程逻辑控制器(PLC)或兼有 DDC、PLC 特性的混合型控制器 HC(Hybrid Controller)。控制器(分站)之间采用对等式(Peer to Peer)的直接数据通信。其中，DDC 控制器在 BAS 中应用广泛。DDC 控制器是一种特殊的计算机，其基本结构与普通计算机相同，通常是由微处理器、网络通信模块、输入输出模块、储存器、电源等部分组成。DDC 控制器具有可靠性高、控制功能强、可编写程序等优点，既能独立监控有关设备，又可通过通信网络接受中央管理计算机的统一管理与优化管理。典型的 DDC 控制器结构如图 1.7 所示。

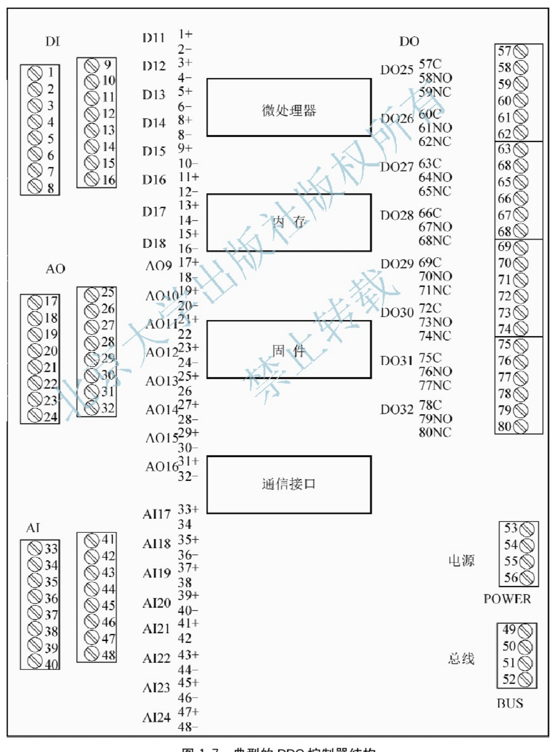


图 1.7　典型的 DDC 控制器结构

3）现场设备网络层

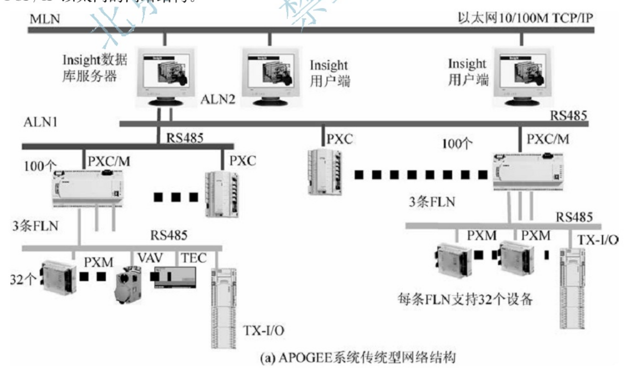
现场设备网络层主要由执行器(电动调节阀、电动碟阀、电磁阀、电动风门等)和传感器(温度、湿度、压力、压差、流量、水位、一氧化碳、二氧化碳、照度、电量等检测仪表)等现场设备组成，用来完成末端设备的控制和现场仪表设备的信息采集和处理。中型及以上系统的现场网络层通常由通信总线连接微控制器、分布式智能输入输出模块、智能传感器和智能执行器等智能现场仪表组成，也可以使用常规现场仪表和一对一连线。现场网络层采用的国际标准通信总线有 TCP/IP、BACnet、LonTalk、MeterBus 和 ModBus 等。微控制器应具有对末端设备进行控制的功能，并能独立于控制器(分站)和中央管理工作站完成控制操作。

3. 实际产品举例——APOGEE 楼宇自控系统

目前国内 BAS 市场中汇集了许多国内外知名楼宇自控产品的厂商。国外品牌厂商如：霍尼韦尔(Honeywell)、江森自控(Johnson Controls)、西门子楼宇科技(Siemens)、施耐德(TAC)、奥莱斯(ALC)等。国内的厂商有浙大中控、清华同方、海湾公司等。本小节以西门子楼宇科技(Siemens)公司的 APOGEE 顶峰系统为例，介绍 BAS 实际产品的网络结构。

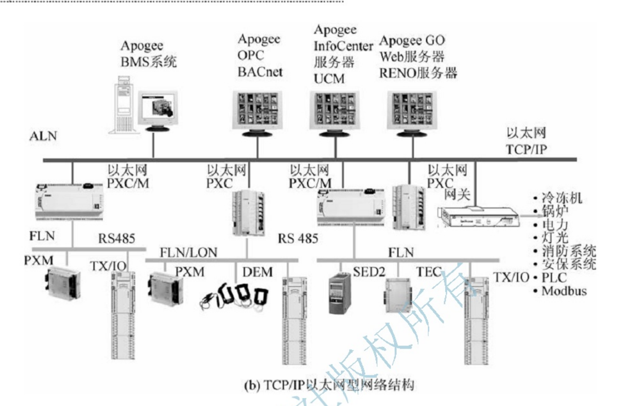
西门子 APOGEE 楼宇自控系统是基于现代控制论中分布式控制理论而设计的集散型系统，是具有集中操作、管理和分散控制功能的综合监控系统。系统的目标是实现建筑物内的暖通空调、变配电、给排水、冷热源、照明、电梯、扶梯及其他各类系统机电设备管理自动化、智能化、安全化、节能化，同时提供最为舒适、便利和高效的环境。

APOGEE 系统由 Insight 管理软件、DDC 控制器、传感器、执行机构组成。一个典型的 APOGEE 系统架构由管理级网络(MLN)、自控层网络(ALN)和现场总线三层网络组成。其中现场层网络包括现场总线(FLN)和点扩展总线(EXP)。如图 1.8(a)所示的 APOGEE 系统是传统的基于 RS485 总线网络结构，图 1.8(b)所示的 APOGEE 系统是基于 TCP/IP 以太网的网络结构。



(a) APOGEE系统传统型网络结构

图 1.8 典型的 APOGEE 系统架构



(b) TCP/IP以太网型网络结构

图 1.8 典型的 APOGEE 系统架构(续)

1.3.6 BAS 的软件平台

1. BAS 的软件平台的组成

在 BAS 的三个网络层有不同的软件，分别是管理网络层的客户机和服务器软件、控制网络层的控制器软件、现场网络层的微控制器软件。

管理网络层(中央管理工作站)配置服务器软件、客户机软件、用户工具软件、工程应用软件以及其他可选择的软件。一般要求管理网络层软件支持客户机/服务器体系结构，支持互联网连接、开放系统和建筑管理系统(BMS)的集成。服务器软件包括监控点时间表程序、事件存档程序、报警管理程序、历史数据采集程序、趋势图程序、标准报告生成程序及全局时间表程序。用户工具软件可以建立建筑设备监控系统网络，组建数据库和生成操作站显示图形界面。工程应用软件可以实现控制器自动配置和 BAS 的系统调试。当 BAS 需要时，还可选择 DSA 分布式服务器系统软件、开放式系统接口软件、火灾自动报警系统和安全防范系统接口软件、企物业管理系统接口软件。

控制网络层软件主要指由用户自由编程的通用控制器的软件，与无需用户编程的现场层的微控制器比较起来，通用控制器的应用范围是任意的，可以对冷水站、锅炉房、空调机、水泵、风机、照明、供配电等多种设备进行各种不同要求的控制。

现场网络层微控制器软件无需用户自行编程。与控制层由用户自由编程的通用控制器比较起来，微控制器(专用控制器)的应用范围不是任意的，只可以对指定的某种现场末端设备进行规定要求的控制，例如 VAV 变风量末端装置、FCU 风机盘管机组等。

2. BAS监测平台

各大厂商的BAS产品都提供强大的软件平台，可以通过良好的用户界面或人机界面，相当方便地实现BAS的网络、数据库、控制器的配置，以及系统监测与管理。有的厂商的BAS产品共用同一个平台实现配置和监测功能，而有的厂商的BAS产品则把配置平台和监测平台分开来。由于BAS往往要监测管理许多不同厂商(或不同标准)的BAS子系统，而不同厂商的产品提供的配置工具和环境又有非常大的差别，因此，现在许多厂商更趋向于把配置和监测两个系统区分开来。

仅通过系统显示功能就可以实现建筑设备运行过程的监测。典型的显示类型见表1-2。

表1-2 典型的显示类型

显示类型	描述
细节	提供有关特定点的详细信息，该信息包括当前值、概况、历史记录等
趋势	一个变量或多个变量用图形显示随时间的数量变化；趋势可以用曲线和柱状图等方法显示
分组	在同一显示界面显示多个相关点的不同种类的信息
汇总	在一个表格里，显示报警和事件的信息；通过点击可以在一个列表中显示更多的详细信息
状态	显示系统设备，如控制器和打印机的详细状态信息

3. BAS的编程方法与编程环境

1) BAS的编程方法

在早期阶段，通常要用特定编程设备将写好的程序写入到ROM或EPROM中，再把ROM或EPROM插入到控制器中运行。现代的控制器编程通常用界面友好的软件工具，而不需要特定的编程设备。

对控制器编程通常包括两种主要任务：一个是配置控制器；另一个是开发和下载应用程序到控制器中。典型的配置任务包括：定义一个工作站作为服务器、定义信道和控制器、定义点、下载配置数据库到服务器上。

对控制器的编程通常有三种方式：一是利用安装在中央管理工作站的编程软件编写、调试程序，通过网络配置控制器和下载程序到控制器上；二是通过PC机或笔记本经串口或USB端口连接到控制器，并调用装在控制器里的编程工具对控制器进行配置、编程调试；三是通过与控制器配套的手操器对控制器直接操作和编程。

2) BAS的编程环境

不同厂商的BAS提供的编程环境有非常大的差别。它们大体上可以被分成3类。

(1) 图形或符号格式编程。图形格式编程环境提供了图形化编程界面及函数库。函数库提供常用的函数模块，用于执行特定程序的计算，如PID函数、差分等，通过选择适当

的函数模块，并根据控制逻辑把它们正确地连接起来，控制程序编程就完成了；再简单地连接相应输入信道获得控制程序需要的测量点，并将程序框图特定出口简单地连接到相应输出信道，便可送出控制决策。

应用这个编程环境，不需要对程序语言有很多的专门培训就可以实现控制器编程。这个编程环境给相对复杂的控制逻辑编程提供了较好的灵活性。然而，对非常复杂和精细的控制程序，该编程环境不是很有效。

（2）模板或表格格式编程。当控制器是专用于某个控制功能或某些控制逻辑可以被汇总成通用格式的建筑设备系统的控制时，特定设备的应用程序可以通过定义或调整通用表格或模板的参数来实现。这种情况下，一个更简单的程序形式，即模板或表格格式编程工具就可以胜任。适于用这种形式编程的控制系统的例子包括照明控制、安防控制和消防火灾探测系统。在这种环境下对控制器编程，提供的编程自由度是有限的。

（3）文档格式高级语言编程。这种编程方法采用过程控制语言，可利用文本编辑器编写程序。这对专门训练过的程序员有了很大的自由度和灵活性。当控制逻辑非常精细复杂时，用这种格式的控制器编程的优点很明显。程序员在掌握这种格式下特定的编程工具之前，需要更多的培训。

特别提示

BAS 文档格式高级编程语言与通常的计算机高级编程语言(Basic，C，Fortran 等)相似，甚至相同。为适合于控制器编程的应用，一些新的规则需要被引入。

例如，西门子楼宇科技公司 APOGEE 楼宇自控系统的 PPCL(Powers Process Control Language)，就是一种类似于 BASIC 的编程语言，专门用于楼宇控制和能源管理的现场控制器的编程。

4. 实际产品举例——Insight 监控软件

西门子 APOGEE 楼宇自控系统的运行管理软件平台称为“Insight”。Insight 基于 Windows 操作系统，采用 Client/Server(客户端/服务器)架构，是以动态图形为界面，向用户提供楼宇管理和监控的集成管理软件。Insight 可以通过一台运行 Windows 的 PC 机管理和控制 APOGEE 楼宇设备。

Insight 具有三大功能。

（1）监视功能。用户可通过动态图形(动画功能)、趋势图等应用程序对 APOGEE 系统控制设备的运行状态、被控对象的控制效果进行实时和历史的监视。

（2）控制功能。用户可通过控制命令、程序控制和日程表控制等应用程序控制楼宇自控设备的启停或调节。

（3）管理功能。包括用户账户管理、系统设备管理、程序上/下载管理，用户还能通过系统活动记录、报表等应用程序了解 APOGEE 系统自身的状态。

Insight 监控软件功能窗口如图 1.9 所示。此外，Insight 还有一系列可选功能，如：自动拨号功能、Internet/Intranet 功能、远程通告功能、历史数据管理/效用成本管理功能、BACnet 支持功能、支持 OPC 技术等。



图 1.9　Insight 监控软件功能窗口

1.3.7　BAS 的基本操作

以某工程项目的 BAS 的操作为例，介绍 BAS 操作人员对 Insight 软件的基本操作。

1. 楼宇自控系统(Insight)的启动与关闭

首先打开计算机电源，按 Ctrl＋Alt＋Del 进入登录界面，输入用户名和密码，单击“确定”按钮即可进入 WINDOWS 桌面。然后，用鼠标左键双击桌面上的图标，或者左键单击“开始”按钮选中“程序”，在它的菜单中单击“Insight Version 3”菜单中的“Insight”启动 BAS。

进入 BAS 监控主界面如图 1.10 所示。若要退出楼宇自控系统，则可单击 Insight 主菜单，选择“Exit”退出系统。

在 BAS 监控主界面中有冷热源系统、给排水系统、照明系统等子系统的监控界面链接，点击即可进入。部分监控子系统的界面如图 1.11 所示。



图 1.10 BAS 监控主界面



(a) 冷热源监控界面

(b) 组合式空调机组监控界面

(c) 新风空调机组监控界面

(d) 通风系统监控界面

图 1.11 部分监控子系统的界面

2. 用户账号的操作

在 Insight 主菜单中选择“User Account(用户账号)”按钮。则 Accounts(账号)窗口打开，如图 1.12 所示。可进行新的用户账号添加、用户账号的修改和删除、访问权限的修改、密码的修改等操作。用户通过一定权限的账号可对特定 BLN 网络上的 Insight PCs 和现场控制器(Field Panels)，进行访问控制和安全管理操作。

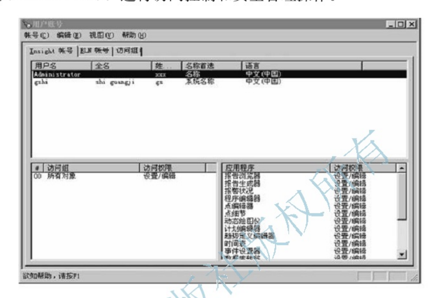


图 1.12 “用户账号”窗口

3. 计划编辑器(Scheduler)

计划编辑器可以对每周 7 天的事件、报告和趋势采集进行定时计划。对于特殊的计划需求，还可以对常规计划进行强制操作，或添加特殊的计划部署。在 Insight 主菜单中，选择“Scheduler(计划编辑器)”按钮，则打开计划编辑器窗口，如图 1.13 所示。计划编辑器可以按照日历来显示指定日期、工作日或代替日的计划。在日历视图中，可以选择某个特定的日期，然后对有关事件、报告或趋势采集的定时计划进行添加、修改、复制或删除操作。日历的月、年翻动功能使用户可以很容易找到任何一个指定的日期。

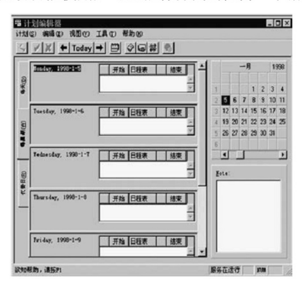


图 1.13 计划编辑器窗口

4. 系统轮廓(System Profile)

所有系统网络和设备的设置都是通过在系统轮廓(System Profile)下进行。在完成网络和设备的设置之后，最终要以图像的方式来表现用户的楼宇控制系统。在用户的楼宇系统所定义的每一个设备和网络都可以用一个图标来表示，并显示在系统树中。用户可以对该系统树进行扩展或收缩。

在 Insight 主菜单中选择“System profile(系统轮廓)”按钮，屏幕显示系统轮廓(System Profile)窗口，如图 1.14 所示。在该窗口可以进行系统设置的定义、Insight PC 定义、自控层网络(ALN)定义、现场控制器定义、楼层级网络(FLN)定义等操作。

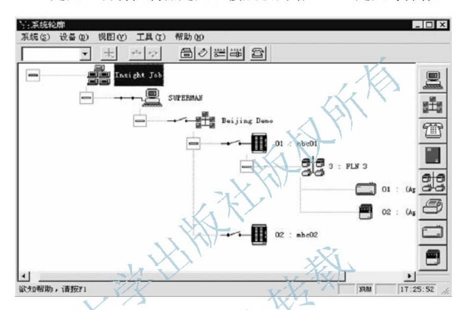


图 1.14 系统轮廓(System Profile)窗口

5. 点的命令控制



图 1.15 Commander 主窗口

对单点的命令控制就是利用 Commander 的人工控制来替代 Insight 的系统程序指令，对输出点(或虚拟输入点)进行控制。点的控制命令将点的命令优先级从 None(无)变为 OPER(操作员)、SMOKE(烟气)、EMER(紧急)或 PDL(高峰需求限制)。

Graphics 图形应用允许在动态图形中选择一个活动的点，然后通过打开 Commander 主窗口来对该点进行命令控制。打开 Graphics 图形应用，确认此时在 Graphics 主窗口右下角的模式显示为“Dynamic Mode(动态模式)”。动态图形只有处于动态模式时，才可以打开 Commander 主窗口；双击准备进行控制的点，则 Commander 主窗口打开，如图 1.15 所示。当 Commander 主窗口打开时，用户可以先进行必要的修改，然后选择控制命令。这里的修改会自动反映到点信息块中。

1.4 建筑设备自动化系统的工程实施

1.4.1 建筑设备自动化系统的设计流程

建筑设备自动化系统要为使用者提供一个安全、高效、节能而又舒适的环境，必须根据建筑物的使用功能和业主的具体需求进行系统设计。BAS 的设计方法及流程如图 1.16 所示。

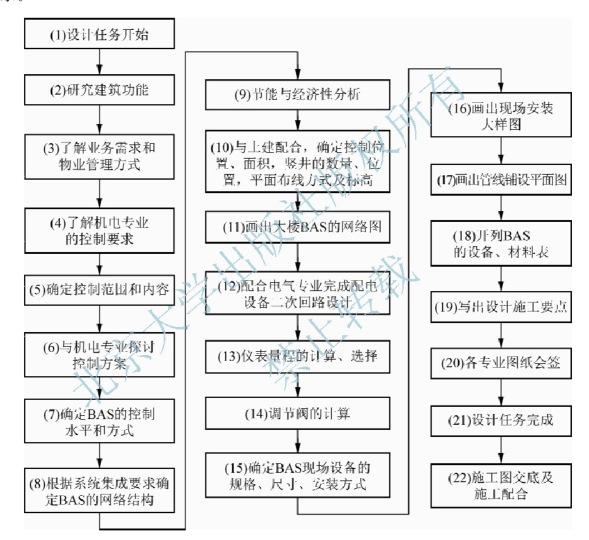


图 1.16 BAS 的设计方法及流程

1. 工程需求分析

研究建筑物的使用功能，了解业主的具体需求以及期望达到的目标；确定建筑物内实施自动化控制及管理的各功能子系统；根据各功能子系统所包含的设备，制作出需纳入楼宇自控系统实施监控管理的被控设备一览表。控制对象系统的确认见表 1-3，用于由设计人员和建设单位共同协商确认可纳入 BAS 控制的对象系统。

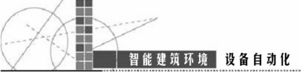


表 1-3　BAS 控制对象系统确认表

对象名称	数量	位置	确认(√/×)	型号、结构特征等备注	对象名称	数量	位置	确认(√/×)	型号、结构特征等备注
1. HVAC 系统					4. 运输系统				
1.1 冷水机组					4.1 客梯				
1.2 冷冻水泵					4.2 高区客梯				
1.3 冷却水泵					4.3 低区客梯				
1.4 冷却塔					4.4 员工电梯				
1.5 空气处理机					4.5 货梯				
1.6 全新风机组					4.6 观景电梯				
1.7 风机盘管					4.7 自动扶梯				
1.8 排风机					4.8 自动人行步道				
1.9 整体式空调机					4.9 消防电梯				
1.10 锅炉系统					5.9 其他				
1.11 城市热力站					5.1 消防系统				
2. 电力照明系统					共用中控室				
2.1 变压器					共用中央监视器				
2.2 发电机组					分设专用终端				
2.3 主配电箱					5.2 出入监控系统				
2.4 分配电箱					重要部位的门监控				
2.5 照明回路					时间程序的门控				
3. 给排水系统					重要通道的监控				
3.1 给水泵					5.3 保安系统				
3.2 给水箱					保安巡更程序				
3.3 气压给水装置					闭路电视监视				
3.4 调速给水装置					防盗监控				
3.5 污水泵									
3.6 污水池									

2. 确定系统的控制方案

对纳入 BAS 控制的子系统给出详细的控制功能说明，并说明各系统的控制方案及达到的控制目的，以指导工程设备的安装、调度及工程验收；根据系统大致的规模及今后的发展，确定监控中心位置和使用面积，并预留接口，与智能化系统设计形成和谐统一的整体。

1）画出各子系统被控设备的监控原理图，并统计 BAS 监控点位

利用监控原理图，可以很好地表达 DDC 对受控对象的控制原理和监控点类型等情况，因此，绘制各子系统的监控原理图是设备配置、施工平面图等工作的前期工作。在各子系统监控原理图的基础上，可以做出 BAS 监控点位总见表 1－4，并计算监控点的总和。至此，BAS 的规模可以完全确定。

表 1－4　BAS 监控点位总表

项目		设备数量	输入输出点数量统计				数字量输入点 DI						数字量输出点 DO				模拟量输入点 AI													模拟量输出点 AO			电源
日期																																	
序号	设备名称		数字输入	数字输出	模拟输入	模拟输出	运行状态	故障报警	水流检测	压差报警	液位检测	手/自动	启停控制	阀门控制	开关控制	其他	风温检测	水温检测	风压检测	水压检测	湿度检测	压差检测	流量检测	阀位	电压检测	电流检测	有功功率	功率因数	频率检测	执行机构	调节阀	其他	
1	空调机组																																
2	新风机组																																
3	通风机																																
4	排烟机																																
5	冷水机组																																
6	冷冻水泵																																
7	冷却水泵																																
8	冷却塔																																
9	热交换器																																
10	热水循环																																
11	生活水泵																																
12	清水池																																
13	生活水箱																																
14	排水泵																																
15	集水坑																																
16	污水泵																																
17	污水池																																
18	高压柜																																
19	变压器																																
20	低压配电																																
21	发电机组																																
22	电梯																																
23	自动扶梯																																
24	照明配电箱																																
25	巡更点																																
26	门禁开关																																

2）系统及设备选型

选型时需要综合技术、经济各项指标，进行全面、客观的分析比较和实地考查，才能最终选出合适的产品。

（1）设备选型要结合各设备布局的平面图，进行监控点划分；根据监控范围，确定系统网络结构和系统软件。

（2）根据各设备的控制要求，选用相应的传感器、阀门及执行机构，并配备满足要求的 DDC 控制器。DDC 控制器的监控点统计可采用表 1-5。

表 1-5 DDC 控制器的监控点一览表

项目		设备位号	通道号	DI 类型				DO 类型				模拟量输入点 AI 要求								模拟量输出点 AO 要求					DDC 供电电源引自	管线要求			
DDC 编号				接点输入	电压输入			接点输入	电压输出			信号类型						供电电源		信号类型			供电电源			导线规格	型号	管线编号	穿管直径
序号	监控点描述						其他				其他	温度（三线）	温度（二线）	温度			其他		其他			其他		其他					
1																													
2																													
3																													
4																													
5																													
6																													
7																													
8																													
9																													
	合计																												

（3）配合强电专业，完成配电设备的二次回路设计。

3）确定中央控制室

和土建专业共同确定中央控制室的位置、面积，确定竖井数量、位置、面积、布线方式等，以使建筑设计满足智能化系统正常运行的要求，与智能化系统设计形成和谐统一的整体，并为智能化系统留有可扩充的余地。

4）画出大楼 BAS 控制网络图

根据 BAS 网络拓扑结构和现场楼宇设备的具体布置，画出的 BAS 控制网络图，如图 1.17 所示。

3. 绘制表达各层管线敷设的施工平面图

在经上述受控对象的监控点位确定和设备选型配置后，可进行 BAS 管线施工平面图的绘制。

4. 开列设备材料表，写出设计、施工要点

开列 BAS 设备、材料表，写出设计、施工要点，各专业图样会签。

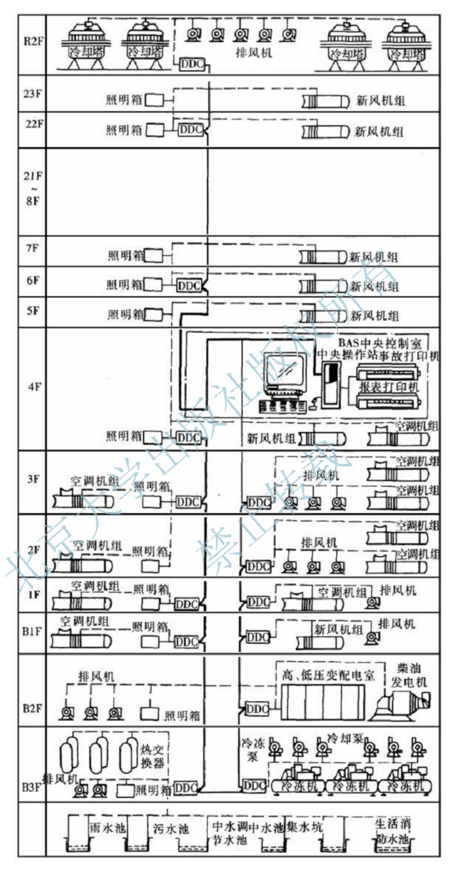


图 1.17 BAS 控制网络图

1.4.2 BAS的设计依据

BAS的工程设计首先要了解目标建筑物所处的地理环境、建筑物用途、BAS的建设目标定位、建筑设备规模与控制工艺及监控范围等工程情况。这些情况一般在工程招标技术文件中介绍，设计者也可以根据自己的经验提出具体实施方案。

业主的招标文件和相关的国家标准、行业标准、地方标准就是整个BAS工程设计的主要设计依据。通常工程招标书是进行BAS工程设计的首要依据，根据其中的建筑物地理环境、建设用途、工程范围等工程情况，选择合适的国家或地方标准规范作为设计依据。

1. BAS相关的设计规范和标准图集

现行的主要国家标准(含行业标准)有：

(1)《民用建筑电气设计规范》(JGJ 16—2008)。

(2)《智能建筑设计标准》(GB/T 50314—2006)。

(3)《建筑设计防火规范》(GB 50016—2006)。

(4)《采暖通风与空气调节设计规范》(GB 50019—2003)。

(5)《自动化仪表工程施工及验收规范》(GB 50093—2002)。

(6)《电气装置安装工程电缆线路施工及验收规范》(GB 50168—2006)。

(7)《电气装置安装工程接地装置施工及验收规范》(GB50169—2006)。

(8)《建筑电气安装工程施工质量验收标准》(GB 50303—2002)。

(9)《智能建筑工程质量验收规范》(GB 50339—2003)。

(10)《公共建筑节能设计标准》(GB 50189—2005)。

(11)《建筑物电子信息系统防雷技术规范》(GB 50343—2004)。

(12)《建筑与建筑群综合布线系统工程设计规范》(GB/T 50312—2007)。

(13)《分散型控制系统工程设计规定》(HG/T 20573—95)。

(14)《智能建筑弱电工程设计施工图集》(97X700)。

(15)《建筑智能化系统集成设计图集》(03X801—1)。

(16)《建筑设备监控系统设计安装》(03X201—2)。

(17)《空调系统控制》(02X201—1)。

特别提示

规范与标准选择时应注意以下几点：

(1) 项目工程范围内所涉及的全部内容，只要国家、地方及行业发布了相关的标准，都应列出，予以遵循。

(2) 所选择的标准规范一定要与目标建筑物的工程情况相吻合。若选择地方标准，则必须为目标建筑物所处地区的地方标准；若目标建筑物为特殊用途建筑物，则需要考虑是否存在相关的特殊行业标准对工程范围内的设计内容进行约束等。

(3) 处理好国家标准、地方标准、行业标准之间的关系。这三者之间的关系是地方标准和行业标准必须遵守国家标准，因此，当论及同一问题时，地方标准与行业标准的要求往往高于国家标准。为体现工程设计及符合国家标准，又符合相关的地方标准、行业标准，因此当列出这部分标准时，应首先列出国家标准，然后列出相关的地方标准、行业标准。

(4) 由于建筑物弱电系统更新换代较快，因此相关标准也经常进行升级，工程设计中所引用的标准版本必须是最新的。

2. 建设单位对BAS的要求

(1) BAS监控范围、控制功能、监控点数。

(2) BAS中央控制室的要求。

① 中央控制室的位置应远离电磁干扰源(如变配电室等)，并尽量安排在控制负荷中心处，注意防潮、防震。

② 中央控制室室内设备布置，应留有足够的操作距离、检修距离等。

③ 室内宜采用抗静电活动地板，土建及装修要求同计算机房。

(3) 现场控制器(DDC)的设置原则及布线方式。

① DDC的设置，应考虑系统管理方式、安装、调试、维护方便和经济性。一般，按机电系统的平面布置，设置在冷冻站、空调机房等控制参数较为集中的地方，或弱电竖井中。

② 每台DDC的输入/输出接口数量与种类，应与所控制的设备要求相适应，并留有10%～15%的余量。

(4) 电缆选择与敷设要求。

① 电缆选择原则：中央操作站至DDC及DDC之间采用截面积为1.0mm^{2}的铜芯聚氯乙烯绝缘屏蔽聚氯乙烯护套线缆(RVVP 2×1.0)或计算机专用通信电缆；DDC与现场设备(如传感器、阀门)之间的控制电缆，一般采用1.0～1.5mm^{2}的铜芯聚氯乙烯绝缘聚氯乙烯护套电缆(RVV 2×1.0)，是否需要采用软线及屏蔽线应根据具体设备而定；DDC与就地仪表、阀门的信号线的规格应随具体控制系统设备与控制要求而定。

② 电缆敷设方式：以沿桥架或线槽明敷为主，出桥架后，穿金属管保护。

(5) BAS的电源。

① 应由变电所引出专用回路向中央控制室供电，供电回路采用保安电源供电。

② 中央操作站应设不间断电源(UPS)装置，其容量应包括系统内用电设备的总和并考虑预计的扩展容量，UPS供电时间不得低于30min。

③ BAS宜采用中央控制室集中供电方式，以放射式供给各DDC，若采用就地供电，则由就近的保安电源供给。

特别提示

保安电源是供给用户保安负荷的电源。当常用电源或主要电源故障断电时，保安电源用来保证用户负荷连续供电，以防发生人身伤亡和设备事故，造成重大经济损失和政治影响。

(6) BAS 的接地要求。

① 一般采用建筑物总体接地方式，要求总体接地电阻不大于 1Ω。

② 如果 BAS 单独设置接地极，应采用一点接地方式，要求接地电阻不大于 4Ω，并且要注意与建筑物防雷接地系统的接地板之间距离不得小于 20m。

1.4.3 BAS 设计的深度要求及内容

BAS 的设计步骤与其他的工程设计一样，其设计深度应符合建设部 2003 年颁布的《建筑工程设计文件编制深度规定》，具体分为方案设计、初步设计和施工图设计 3 个阶段。

特别提示

本小节中的设计深度是指 BAS 作为整体工程项目设计的一个专业，与建筑等各专业同时进行的设计工作，与各集成商所做的 BAS 投标方案设计有较大差异，BAS 的投标方案设计应根据招标书的要求完成。

1. BAS 的方案设计内容

在方案设计阶段，主要是规划 BAS 系统的大致功能和主要目标，并提出详细的可行性报告。方案设计文件应满足编制初步设计文件的需要。BAS 设计在方案设计阶段通常无须图纸，只需完成设计说明书和系统投资估算。

设计说明书中应包括：设计依据，设计范围和内容，BAS 的规模、控制方式和主要功能。根据 BAS 的规模和内容完成系统投资估算，常采用面积估算法，如：50000m^2 办公业务综合楼的 BAS，按 30 元/m^2 造价估算，共需约 150 万元。

BAS 方案设计如为方案投标的一部分，应满足招标书中的有关要求。

2. BAS 的初步设计内容

在初步设计阶段，作为 BAS 系统的设计承包者，应向用户提供以下一些资料。

(1) 该工程项目的设计说明书。其内容包括：BAS 的设计依据、系统功能、系统组成、总监控点数及其分布，系统网络结构，系统硬件及其组态，软件种类及功能，系统供电(包括正常电源和备用电源)，线路及其铺设方式。

(2) 设计图纸。其内容包括：图纸目录、主要设备材料表、BAS 系统图、各子系统的 BAS 监控原理图、控制室设备平面图等。

(3) 设备(硬/软件)选型要求说明。

3. BAS 的施工图设计内容

施工图设计文件应满足工程项目的施工需要，施工图文件的主要内容为图纸。施工图设计文件应包含以下内容。

1) 图纸目录

包括图纸名称、图号、图幅等。

2）施工设计说明

施工设计说明中应包括：工程设计概况(应将审批后的初步设计中相关部分的主要技术指标录入)、建筑监控设备系统的监控范围和内容、控制室位置、建筑主要设备测量控制要求、现场控制器设置方式、电源与接地要求、系统施工要求和注意事项、其他要说明的问题。

3）材料表

应包括：主要线缆、穿管、电缆桥架的型号、规格、数量，现场传感器的导压管、主要阀门的规格、数量等。

4）设备表

按工艺系统的顺序，详细列出建筑监控设备系统中各种设备的名称、规格、数量、测量范围、输入输出信号要求、工作条件、技术要求、型号等。

5）BAS 系统图

BAS 系统图表示了大楼中 BAS 的全部控制设备(从监控主机到 DDC)之间的关系，图中应能表示出建筑物内主机系统、网络设备和 DDC 的编号、数量、位置、网络连线关系等，还应表示出 DDC 所监控对象的主要内容和被监控设备的楼层分布位置及通信线路选择。系统图表示到 DDC 为止。

6）电源分配原理图

电源分配原理图是表示 BAS 的总体供电系统图，其中应表示：电源来源、配电至 BAS 控制室设备、各 DDC 控制箱及现场设备的方式和设备、管线编号。

7）各子系统监控原理图

子系统包括冷冻站系统、热交换系统、空调系统、新风系统、给排水系统、送排风系统、电力系统、照明系统等系统。监控系统原理管线图为表示该子系统的设备和工艺流程，以及 BAS 对其进行监控的原理图，其中应注明子系统的工艺流程、仪表安装处的管道公称直径及参数、监控要求、监控点位置、接入 DDC 的 I/O 信号种类、现场控制器至每台现场仪表的电缆规格、编号等。

8）BAS 管线敷设平面图(施工平面图)

BAS 管线敷设平面图中应示出被控工艺设备、现场仪表、DDC 控制箱、BAS 控制室的位置，以及设备之间电缆、穿管、桥架的走向。

9）BAS 控制室设备平面布置图

图中应标出控制室安装设备位置的主要尺寸。

10）BAS 监控点表

统计 BAS 监控点表，可作为招标用文件。

施工图设计之后，经由 BAS 招投标产生工程承包商。工程承包商还应进行 BAS 施工图深化设计。其中主要包括设备的生产制造图纸和设备机房内的大样安装图纸。BAS 的设计单位应负责审查承包方提供的深化设计图纸。

1.4.4 BAS的系统选型

目前，供应BAS的厂商颇多，大都自成系统，成套推出各自的定型产品，不同厂家的产品千差万别、各具特色。加之，BAS本身又是一个涉及计算机技术、控制技术、通信技术等多种高新技术的复杂系统，如何根据大厦的功能要求从众多商品中选择出合适的产品十分重要，且有一定难度，需要综合技术、经济各项指标进行全面、客观的分析比较和实地考查，才能最终确定。一般，可从下列几个方面进行考虑。

1. 可靠性高

系统的可靠性是系统在规定条件下和规定时间内完成规定功能的能力。它表示系统长期、稳定工作的能力，通常用平均故障间隔时间(Mean Time Between Failures，MTBF)来衡量，MTBF越大，系统的可靠性越高。一般的分散控制系统，MTBF都在50000h以上。但MTBF是一个统计量，并非可以直接测量的物理量。因此，选型时不能只根据MTBF值来判断可靠性，更要考查可靠性的保障措施，如体系结构是否合理、系统软件组成是否合理、系统关键部件的容量是否留有足够的裕度、系统是否成熟以及合理的冗余措施等。系统的可靠性既是一个质量指标，也是生产厂家生产规模和管理水平的综合反映，因此，考查可靠性指标时，除了要看设计是否合理之外，还要看生产过程、企业管理水平和质量保护措施。如能到使用过该系统的用户处实地考查一下实际使用情况是十分有益的。

2. 技术先进

当今技术发展迅速，设备淘汰速度也在加快，所以应该选择技术上先进的系统。先进的技术可以从原理上保证系统的高可靠性：集中控制系统可靠性最差，集散控制方式较好，无中心结构的完全分布式控制模式可靠性最高。所选产品应是该公司所提供的成熟的最新产品，不要选择价格虽低，但属于即将淘汰的清仓销售产品。否则，系统刚刚安装完毕就已经落后，今后的维修、改造十分麻烦，后患无穷。

3. 互操作性好，便于构成开放式系统

建筑设备自动化系统涉及各个楼层的各类监控系统，庞大而复杂。一方面，为了能对各种设备进行最优组合，达到最高的性能价格比，往往需要选择不同厂家的产品组成自动化系统，因而要求这些来自不同厂家的子系统之间能够互连，具有互操作性；另一方面，从系统的维护、扩展、更新以及原有工程升级改造的角度考虑，也必然要求新、老产品之间具备互联、互操作的能力。因此，应该选择互操作性良好的开放式系统。然而，目前的情况是，同一公司的产品可保持向上兼容性，不同厂商的产品则较难实现互联，互操作性差。通常需要制作复杂的接口，并进行通信协议转换。有些产品尽管已经做了互连工作，但并未经过现场操作的严格考验，仍然不能很协调地在一起工作。如果不慎，选择了没有互操作性的产品将造成极大的浪费。为避免浪费，应选择通信协议、接口符合主流标准的开放式系统。

4. 符合主流标准

主流标准通常有两种：一种是国际标准化组织(如ISO)批准的或建议采用的标准；另

一种是工业界已经认可的事实上的习用标准。这些习用标准往往已在实际工程中具有数量多、范围广的成功应用范例。具有开放性和高可靠性的系统必然是按照国际标准规范设计的产品，因此最有生命力的产品是符合主流标准的产品，而不符合主流标准的产品最终将被淘汰。

5. 满足实用要求

选择一套楼宇自控系统，首先考虑的应该是满足设计要求，并且实用。例如：系统的控制功能是否满足控制方案的要求，组态是否灵活，实现是否困难，控制操作是否方便；系统的信号处理、隔离水平、防辨能力、信号驱动能力等是否满足现场要求；系统人机界面是否友好，是否采用汉字提示，是否具有窗口显示功能；系统的报警提示是否全面，报表制作与打印是否方便等。然后，考虑未来发展的需求，留出足够的余量。千万不要受厂家宣传的影响，去增加许多永远也用不上的功能，反而忽视了真正需要的实用性功能。考查实用性时，亲自到厂家或其他用户处看看应用情况是很有必要的。

6. 便于维修

系统的维修性是指系统排除故障的难易程度，主要应考虑下述几方面。

(1) 系统的固有维修性。是指系统在硬件和软件方面排除故障的难易程度，通常用平均修复时间(Mean Time to Repair，MTTR)来衡量。系统的 MTTR 由下述因素决定：系统的故障自诊断能力；系统的故障指示能力(系统在出现故障时有无明显的指示灯标志，CRT 上有无故障位置指示等)；插件的更换是否容易(是在带电运行状态下直接更换模板，还是需停止运行才能更换，更换模板时是否需要重新接线等)。

(2) 维修资源的获取程度。是指系统的备件是否容易获得，如国内能否买到及购买时间等。

(3) 厂家所提供的系统是否将要停产，停产后的备品、备件能供应多长时间等。

7. 寿命周期成本低

系统的寿命周期(Lifecycle)，是指从产生开发要求算起直到报废为止的整个生存期。在建筑物的生命周期之内，楼宇控制系统必然要经历安装、维护、改造和扩充等阶段，相应地涉及设备本身价格、安装费用、运行费用、维修费用和改造、扩充费用，其中，最初的设备价格及安装费用与其整个寿命周期的成本相比，只占一小部分。显然，应该选择维修简便、易于扩充、运行费用低的系统，只有这样，才能降低整个寿命周期的成本。

考虑设备本身价格时，不能片面地只顾追求低价格，还应考虑系统配置是否合理。有些厂家在压低价格的同时，降低了系统配置，使系统性能也降低了，这是不足取的。

运行费用是必须考虑的因素，以采暖、制冷、空调设备为例，应该考查是否采取节能措施，效果如何，能源综合利用情况等，否则运行费用将居高不下。

改造、扩充费用一般用于升级改造和扩展更新，这部分费用与网络架构、系统是否具有开放性密切相关。

维修费用是指用户购买备件的价格、备件数量及售后服务费用。有些厂商为了在竞争中获胜，拼命压低价格，一旦中标，签订合同之后，并通过提高备件价格或售后服务价格而获取利润。这种教训不少，必须引起重视。

8. 厂家实力与售后服务

售后服务应考查系统的保修期、保修期过后的维修是否方便、费用高低、厂家所能提供的现场服务能力、方便程度以及价格。售后服务还受厂家经营管理方针、管理水平、人才能力的影响，应该考查厂家的技术实力、生产能力以及在楼宇自控行业的业绩、用户评价与市场占有率，更要考查厂家近几年的发展状况，是处于维持状态、迅速上升还是萎缩状态。一个还在上升的企业是很有生命力的；另一个萎缩的企业可能几年后就要被挤出这个行业，如果选用他们的产品，日后的维护就会成问题。

1.4.5 DDC控制器的设置原则

DDC设置应首先考虑工艺设备监控的合理性，原则上每组工艺设备系统应由同一台DDC控制器进行监控，以增加系统可靠性，便于系统调试。

现场控制器的输入和输出点应留有适当余量，以备系统调整和今后扩展，一般预留量应大于10%。

DDC应布置在被监控对象的附近，以便于节省仪表管线，并有利于系统调试和维修。通常采用挂墙明装方式，安装高度便于操作，内部强弱电应明显分开。DDC控制箱应选择相应合理的防护、结构和规格尺寸。

设备机房上下对齐时，DDC宜就近垂直组网，通信网络无须绕行竖井。

1.4.6 BAS控制室的设置原则

BAS控制室可单独设置，或与其他弱电系统的控制机房，如消防、保安监控等集中设置。若单独设置，则控制室可设置在建筑物内任何场所，但应远离潮湿、灰尘、振动、电磁干扰等场所，避免与建筑物的变配电室相邻及阳光直射。如果集中设置，则控制室必须满足建筑物消防控制室的设计规范要求。

BAS控制室所需面积，除满足日常运行操作需要外，还应考虑系统电源设置、技术资料整理存放及更衣等面积要求。控制室内如采用模拟屏，其上安装的仪表和信号灯，可由现场直接获取信号，也可由单独设置的模拟屏控制器上通过数据通信方式获取信号。

BAS控制室应参照计算机机房设计标准进行设计和装修，室内宜安装高度不低于200mm的抗静电活动地板。控制室应根据工作人员设置电源和信息插座，电源插座设置应考虑检修与安装工作的需要。控制室内设置建筑设备监控系统的监控主机。如管理需要，建筑物内其他场所也可设置分控室，再设置监控主机用于设备监控管理。

1.4.7 BAS的线路敷设方法

1. 现场管线敷设原则

建筑设备监控系统的仪表与电缆管线敷设，应符合建筑电气设计的有关规范。实际工程应用中还应参照相应品牌设备的技术手册。

2. 仪表信号与控制电缆选择

仪表控制电缆宜采用截面为1～1.5mm^{2}的控制电缆，根据现场控制器要求选择控制电

缆的规格，一般模拟量输入输出采用屏蔽电缆，开关量输入输出采用普通无屏蔽电缆。

利达恒信公司的《HBS楼宇自控系统设计手册》，见表1-6和表1-7。

表1-6 控制器用线缆

用　途	线　规　格	线径/mm²	最远使用距离
模拟量输入	RVV或RVVP，2芯	≥1.0	150
模拟量输出	RVV或RVVP，2芯	≥1.0	150
数字量输入	RVV，2芯	≥1.0	200
数字量输出	RVV，2芯	≥1.5	—
电阻测量	RVV或RVVP，3芯	≥1.0	100
频率信号输入	RVV或RVVP，2芯	≥1.0	200
电源线	RVV，2芯	≥1.5	—

表1-7 通信用线缆

用　途	线　规　格	线径/mm²	最远使用距离/m
RS232	屏蔽双绞线	0.2(24AWG)	15
RS485/MSTP	屏蔽双绞线，2芯	0.2(24AWG)	1000
BACnet/EIB	双绞线，2芯	1.0(16AWG)	1000
以太网100Base-TX	五类非屏蔽双绞线	—	100

3. 通信线缆选择

现场控制器及监控主机之间的通信线，在设计阶段宜采用控制电缆或计算机专用电缆中的屏蔽双绞线，截面为0.5～1mm²。如设计在系统招标后完成，则应根据选定系统的要求进行。

4. 电源线选择

向每台DDC控制器的供电容量，应包括DDC和DDC所连接的现场仪表所需用的电容量，宜选择铜芯控制或电力电缆，导线截面应符合电力设计相关规范，一般在1.5～4.0mm²之间。

5. 仪表测量管路的选择与安装

仪表导压管选择，应符合工业自动化仪表有关设计规范，一般选择$\phi 4\times 1.6$无缝钢管。

仪表管路敷设，应按照工业自动化仪表管路敷设有关规定，设置一次阀、二次阀、排水阀、放气阀、平衡阀等，管路敷设应符合标准坡度要求。

6. 电缆穿管的选择

建筑设备监控系统中的仪表信号、电源与通信电缆所穿保护管，宜采用焊接钢管，电缆面积总和与保护管内部面积比为35%。

地面与墙内安装的电缆穿管，一般由土建施工单位安装。

7. 电缆桥架选择

在线缆较为集中的场所宜采用电缆桥架敷设方式。电缆桥架敷设时应使强弱电缆分开，当在同一桥架中敷设时，应在中间设置金属隔板。电缆在电缆桥架中敷设时，电缆面积总和与桥架内部面积比一般应不大于40%。电缆桥架在走廊与吊顶中敷设时，应注明桥架规格、安装位置与标高。电缆桥架在设备机房中敷设时，应注明桥架规格，其安装位置与标高可根据现场实际情况而定。

1.4.8 BAS的供电与接地

1. 供电方式

稳定、无干扰的供电系统是DDC控制器正常工作的重要保证。在工业控制环境中为保证DDC控制器的电源质量，通常采用双路供电、变压器隔离、装设UPS以及其他冗余措施。

尽管BAS对电源的要求不如工业控制环境那么严格，但BAS的现场控制器和仪表宜采用集中供电方式，即从中央控制室(或操作员站)放射性向现场控制器和仪表敷设供电电缆。这样DDC的电源质量基本与中央控制室或操作员站设备的电源质量相同，且具有UPS保护，也便于系统调试和日常维护。许多工程中现场控制器采用“就近取电”的方式供电，这种做法无法保证良好的电源质量和电源可靠性，是不可取的。

2. 配电柜

主控室应设置配电柜，总电源来自安全等级较高的动力电源，总电源容量不小于系统实际需要电源容量的1.2倍，配电柜内对于总电源回路和各分支回路，都应设置空气开关作为保护装置，并明显标记出所供电的设备回路与线号。

3. UPS选配原则

BAS的UPS配置，应采用在线式不间断电源，保护范围为控制室计算机监控系统，蓄电池容量应保证断电后维持BAS主机系统工作30min。

4. 接地原则

建筑设备监控系统的主控室设备、现场控制器和现场管线，均应良好接地。

5. 接地方式

建筑设备监控系统的接地方式可采用集中共用接地或单独接地方式，采用联合接地时接地电阻应小于1Ω，采用单独接地时接地电阻应小于4Ω。

6. 屏蔽接地与保护接地

建筑设备监控系统的接地一般包括屏蔽接地和保护接地：屏蔽接地用于屏蔽线缆的信号屏蔽接地处；保护接地用于正常不带电设备，如金属机箱机柜、电缆桥架、金属穿管等处。

1.4.9 BAS的造价估算

在建筑设备监控系统的工程实施过程中，在方案设计、初步设计、施工图设计阶段以

及系统招投标阶段，都要求对建筑设备监控系统的投资造价做出估算、概算和预算，针对不同阶段的要求，建筑设备监控系统常采用以下几种投资造价的估算方法。

1. 面积估算法

在大楼内机电设备系统尚未开始设计或未完全确定之前，根据建筑物的性质和面积，参照同类建筑物中的建筑设备监控系统的投资，凭经验按照建筑面积估算 BAS 投资，此即为面积估算法。该法多用于早期项目投资估算，如方案设计阶段。

BAS 按面积造价估算，通常为人民币 20～40 元/m^2。对于建设规模较大或机电设备较简单的建筑物，其平均造价较低。对于建设规模较小或机电设备较复杂的建筑物，其平均造价较高。一般可根据各地建筑市场的价格进行估算。

本方法简单易行但准确性差，且需要较多经验和同类项目的数据，可在项目建设初期进行建筑设备监控系统的价格粗略估算时采用。

2. 点数估算法

在大楼的机电设备系统设计到一定深度后，专业人员可根据大楼机电设备的监控要求，设计或估算出建筑设备监控系统中各个子系统的总监控点数量，再按照监控点数估算出建筑设备监控系统的投资。

建筑设备监控系统如按监控点数造价估算，通常为人民币 1500～2500 元/点，对于监控数字量较多的建筑设备监控系统，其平均造价较低；对于监控模拟量较多的建筑设备监控系统，其平均造价较高。

如某酒店，建筑设备监控系统的总监控点为 1000 点，按 2000 元/点估算，共需约 200 万元。

本方法比面积估算法准确度有所提高，但并未区分现场仪表种类规格，建筑设备监控系统的功能要求不明，因此准确性仍然较低，多用于建筑物中机电设备的工艺控制方案完成后的投资估算，如初步设计阶段。

3. 设备估算法

在大楼的机电设备系统要求已经确定，建筑设备监控系统的设计完成之后，可根据建筑设备监控系统设计完成后的监控设备、材料表、系统功能等详细要求，以及根据建筑设备监控系统实际造价或市场平均造价，列出系统及设备、材料的单项价格表，逐项计算得出设备总造价，再估算出系统安装调试费，计算出本项目的建筑设备监控系统总投资造价。建筑设备监控系统的工程量或安装调试费，可根据以下两种方式得出。

1）投资比例估算法

先计算出建筑设备监控系统的设备总投资，再根据设备总投资的一定比例进行百分比取费，估算出安装调试费，通常按照建筑设备监控系统设备总投资的 10%～15%进行取费。本费用中通常包括：安装费、调试费、安装指导费、运输保险费等。

本方法的优点是简单易行，工作量小，但缺点是收费无依据，合理性差，也不利于按照工程进度进行付费，常用于投标时间较短时的系统造价估算，或项目业主进行系统造价的粗略估算。

2）工程定额法

根据设计完成的建筑设备监控系统中的设备、材料表，严格按照建设部或各、省、市地方的“建筑安装工程预算定额”中建筑设备监控系统有关部分的工程量进行逐项取费计算，得出准确的建筑设备监控系统安装调试费。

本方法按照国家相关规定执行，操作合理且计算准确，是目前大型工程中常用的规范操作方式，值得提倡，但有时各地情况和标准定额之间也有一定差距，须根据项目实施所在地的实际情况做出相应调整。

1.5 实际工程认知参观——以宁波某书城为例

1.5.1 参观内容及要求

通过现场参观，可增加读者对 BAS 实际设备的感性认识。同时，与同行技术人员的交流也很重要。通过交流，读者可以了解工程管理情况、行业现状与前景等信息。读者不妨就以下几个方面对所参观的项目做个总结。

（1）该项目的工程概况和投资情况。

（2）智能建筑工程的专业范围、项目实施的相关方单位。

（3）主要的建筑机电设备和智能化系统设备(如品牌、厂商、铭牌技术参数等)。

（4）该项目 BAS 的架构与组成、BAS 的主要设备。

（5）BAS 人机界面情况、运行管理的组织结构等。

（6）BAS 的运行效益。

1.5.2 宁波某书城工程概况

该项目地处江东滨水核心区，位于惊驾路以南，甬江大桥以北，甬江以东，江东北路以西。本工程为大型建筑群，主要包括：1 号楼为宾馆；2 号楼为写字楼；3 号楼底层和二层为餐厅和专业书店，上部为三层扩建部分；4 号楼和 5 号楼为原厂房改造和扩建的通用商业空间；6 号楼为公厕；7 号楼为由原锅炉房改造的餐厅；8 号楼地下两层为地下车库，地上 1～4 层为新华书店，5～16 层为商务办公写字楼。

本工程有 1 个主入口，1 个次入口，2 个地下车库，4 个地下车库出入口；其中，1 号楼和 8 号楼为新建工程，其余楼为改建和扩建工程；6 号楼为公厕，无需智能化系统设计。

项目经济指标：总用地面积 4.05hm^2，总建筑面积 91061m^2，容积率 1.50，建筑密度 25%，机动车停车位 607 个。

1.5.3 宁波某书城建筑智能化项目的工程主要内容

该建筑智能化项目的工程内容主要有：语音通信系统；计算机网络系统；综合布线系统；卫星及有线电视接入系统；安全防范系统(入侵报警系统，视频监控系统，电子巡查系统)；一卡通系统(门禁系统，梯控系统，停车库管理系统，消费系统)；背景音乐系统；酒店智能客房控制系统；公共信息发布系统(LED 显示屏，电梯厅 LCD，多媒体触摸屏系

统)；多功能会议系统；楼宇自控系统(BAS)；能量计量系统；PS及防雷接地系统；机房建设系统；智能技术系统集成。

1.5.4 机电设备和楼宇自控系统

BAS采用集散式的结构模式，现场控制器DDC具有独立控制和通信等功能，所有DDC控制器要求采用UPS集中供电。楼宇自控系统有以下监控内容。

(1) 冷热源系统。预留BA网关通信接口，与冷热源群控系统相连。

(2) 空调机组。监测空调机组的回风温度，或室内温度；CO_2监测；机组的启停，水阀的调节；风机的运行、故障、手/自动状态检测，三档调速控制；过滤网两侧压差。

(3) 新风机组。监测新风机组的送风温度；机组的启停，水阀的调节；风机的运行、故障、手自动状态检测，启停控制/三档调速控制；过滤网两侧压差。

(4) 风机盘管。总配电箱的运行、手/自动状态检测，启停控制；另外，设置供水总管蝶阀，控制其开关。

(5) 送/排风机系统。风机运行、故障、手/自动状态检测；启停控制；CO浓度检测。

(6) 给排水系统。生活水池的超高/超低液位监测；集水井的超高液位监测；生活水泵、排污泵的故障报警、运行状态监测等。

(7) 照明系统。主要对楼层公共照明、地下室照明以及泛光照明的运行、手/自动状态检测，启停控制；其中，泛光照明需等室外电气图纸确定后再做设计。

(8) 变配电系统。以网关的形式与BA通信，需要变配电系统提供通信接口方式及通信协议。

(9) 电梯系统。采用BA通信接口，网关通信采集电梯运行参数。

特别提示

冷热源群控系统、变配电系统、VRV空调及电梯系统通过网关接口与BAS集成。

本章小结

本章是学习智能建筑环境设备自动化应首先具备的入门知识。掌握和了解智能建筑、建筑环境和建筑设备自动化系统的定义、功能、组成架构、软件平台，以及工程实施流程等知识是全书的基础，具有极为重要的意义。

智能建筑通过对建筑物的4个基本要素(结构、系统、服务、管理)以及它们之间的内在联系，以最优化的设计，提供一个投资合理又拥有高效率的优雅舒适、便利快捷、高度安全的环境空间。智能建筑由BAS、CAS、OAS三大基本要素有机结合，构筑于建筑物环境平台之上。根据我国现行设计标准，智能建筑的智能化系统工程设计宜由智能化集成系统、信息设施系统、信息化应用系统、建筑设备管理系统、公共安全系统、机房工程和建筑环境等设计要素构成。

智能建筑应为人们提供高效、便利的工作和生活环境，应适应人们对舒适度的要求，

应满足人们对建筑的环保、节能和健康的需求。智能建筑环境包括物理环境、光环境、电磁环境、空气质量等方面。了解这些环境要求，也就为 BAS 明确了目标。

BAS 通过对建筑物内部机电设备运行、能源使用、环境、交通及安全设施进行监测、控制与管理，为用户提供一个既安全可靠、节约能源，又舒适宜人的工作或居住环境。BAS 有广义和狭义之说。本书所讨论的为狭义 BAS。狭义 BAS 的控制对象包括电力、照明、暖通空调、给水排水、电梯等设备。到目前为止，BAS 的发展经历了四个阶段：中央监控系统、集散控制系统、现场总线控制系统、与互联网/内部网兼容的开放式 BAS。BAS 的功能主要体现在四个方面：为建筑物提供良好环境；优化建筑物内机电设备系统的运行管理；提高工作人员效率，减少运行人员及费用和节能控制。

BAS 的硬件通常是由中央站、现场控制器、仪表和通信网络四个主要部分组成。对于大型 BAS 系统，一般采用三层网络结构：管理网络层、控制网络层、现场设备网络层。BAS 的三个网络层有不同的软件，分别是管理网络层的客户机和服务器软件、控制网络层的控制器软件、现场网络层的微控制器软件。各大厂商的 BAS 产品都提供强大的软件平台，可以通过良好的用户界面或人机界面，方便地实现 BAS 的网络、数据库、控制器的配置，以及系统监测与管理。BAS 的编程环境大体上可以分成 3 类：图形或符号格式编程；模板或表格格式编程；文档格式高级语言编程。本章还结合实际工程介绍了西门子 APOGEE 楼宇自控系统的架构、软件平台和简单的操作。

最后介绍了 BAS 工程实施(包括设计流程、依据、系统设计的深度要求、系统设备选型、控制室和 DDC 的设置原则、线路敷设、供电与接地、造价估算等)，旨在让读者建立起对解决 BAS 工程问题的总体把握与思路。对于 1.4 节的知识点，读者在学习了后续章节之后将有更深刻的理解。

习　题

一、填空题

1. 世界第一幢智能大厦于__________年在__________国的哈特福德(Hartford)市建成，该大厦改造后定名为__________。

2. 智能建筑也称__________，其英文全称是__________，缩写为__________。

3. 中国对 IB 的定义可以简单地表示为：__________。

4. 所谓智能建筑，就是通过对建筑物的 4 个基本要素：__________、__________、__________、__________，以及它们之间的内在联系，以最优化的设计，提供一个__________的环境空间。

5. BAS 通常是由中央站、__________、仪表和__________四个主要部分组成。

6. BAS 一般采用__________式系统和多层次的网络结构。典型的 BAS 网络结构由__________、__________、__________三个网络层构成。三层之间的信息传输依靠__________系统来支持，同层内各装置之间由本层的__________进行联系。用于网络互联的通信接口设备根据各层不同情况，以__________为参照体系，合理选择中继器、网桥、路由器、网关等互联通信接口设备。

7. 对于大型 BAS 系统，一般采用__________网络结构。中型 BAS 系统一般采用__________网络结构，若采用两层网络结构由__________层和__________层构成。小型 BAS 系统一般采用__________网络结构。

8. 在 BAS 的三个网络层有不同的软件，分别是管理网络层的__________软件、控制网络层的__________软件、现场网络层的__________软件。

9. 对控制器的编程通常有三种方式：一是____________；二是____________；三是____________。

10. 不同厂商的 BAS 提供的编程环境有非常大的差别。它们大体上可以分成三类：__________格式编程；__________格式编程；__________格式高级语言编程。

11. BAS 中央操作站应设不间断电源(UPS)装置，其容量应包括__________的总和并考虑__________容量，UPS 供电时间不得低于__________ min。

12. 10 万 m^2 写字楼的 BAS 按 30 元/m^2 造价估算，共需约__________万元。

13. 根据建设部 2003 年颁布的《建筑工程设计文件编制深度规定》，智能建筑 BAS 设计深度具体分为 3 个阶段：__________、__________和__________。

14. 现场控制器(DDC)的输入输出点应留有适当余量，以备系统调整和今后扩展，一般预留量应大于__________%。

15. 某大楼建筑设备监控系统的总监控点为 1200 点，按 2500 元/点估算，共需约__________万元。

二、简答题

1. 比较智能建筑的各种定义，分析其区别与联系。

2. 查阅《智能建筑设计标准》(GB/T 50314—2006)有关“智能建筑”的定义。

3. 简述智能建筑的组成。

4. 3A 是指哪几个系统？5A 是指哪几个系统？通过 Google、Baidu 等网站搜索有关智能建筑组成的文献资料，分析这两种提法是否矛盾。

5. PDS 在智能建筑中的作用是什么？

6. 简述 BAS 与智能建筑的关系。

7. 智能建筑的环境有哪些总体要求？智能建筑对物理环境、光环境、电磁环境、空气质量有哪些具体要求？

8. 广义的 BAS 和狭义的 BAS 有哪些区别和联系？

9. 简述 BAS 的发展历史。

10. BAS 在智能建筑中的功能是什么？其监控范围包括哪些？

11. 分析 BAS 在建筑节能方面的作用，并举例说明建筑设备监控系统是如何起到节能作用的。

12. BAS 是否属于国家强制实施的标准范围，在大楼建设中是否采用 BAS 主要考虑哪些因素？

13. 查阅网络资料，列举我国实施 BAS 项目要参考的标准与规范。

14. 对于建筑设备自动化系统工程设计需要进行哪些工程需求分析？

15. 简述建筑设备自动化系统的设计流程。

16. 利用 AutoCAD 绘制图 1.17 的"BAS 控制网络图"。

17. 利用 Excel 软件编制表 1-4"BAS 监控点位总表"和表 1-5"DDC 控制的监控点一览表"。

18. BAS 对中央控制室的要求有哪些?

19. 简述现场控制器(DDC)的设置原则及布线方式。

20. 简述 BAS 对电缆选择与敷设的要求。

21. 简述 BAS 的接地要求。

22. BAS 的方案设计、初步设计、施工图设计的内容有哪些?

23. BAS 的系统选型主要从哪几方面考虑?

24. 思考 BAS 的供电与接地方式。

25. BAS 的造价估算方法有哪些?

26. 比较投资比例估算法和工程定额法的方法、使用场合和优缺点。

27. 对所参观的 BAS 工程,撰写一篇参观实习报告。

28. 利用 AutoCAD,绘制典型的 BAS 三层网络结构。

第2章 建筑设备自动化系统的主要硬件设备

教学目标

本章主要介绍建筑设备自动化系统的硬件设备。通过本章的学习，了解计算机控制系统的基本知识，掌握DDC控制器、传感器、执行器等硬件设备的基本原理、技术参数和接线安装，从而进一步理解BAS的架构，为后续章节学习BAS对建筑设备的控制打好基础。

教学步骤

能力目标	知识要点	权重	自测分数
掌握自动控制系统、计算机控制系统的基本知识	自动控制系统的组成、方框图	2%	
	计算机控制系统的组成	2%	
	计算机控制系统的分类	3%	
	集散控制系统与总线控制系统	3%	
掌握DDC控制器的作用、分类，掌握并理解I/O通道等接口的外在特性，了解当前市场的主流产品，理解四种基本的控制规律	DDC的作用、分类、控制箱等	5%	
	四类I/O通道：DI、DO、AI、AO	10%	
	DDC控制器主流产品	5%	
	四种基本控制规律：双位、比例、积分、微分	10%	
了解BAS中主要传感器的工作原理，掌握其作用、信号特点和安装方法，掌握传感器与DDC之间的接线方法，理解传感器的选型依据	传感器的工作原理、分类、接线	5%	
	传感器的性能指标	5%	
	常用的模拟量传感器	15%	
	常用的开关量传感器	5%	

续表

能 力 目 标	知 识 要 点	权重	自测分数
掌握执行器的功能作用，了解其工作原理，理解电动调节阀的流量特性和口径选择，理解电磁阀、两位旋转阀、电动调节风门的应用知识	电动调节阀	20%	
	电磁阀	3%	
	两位旋转阀	2%	
	电动调节风门	5%	

▶▶章节导读

第1章对BAS做了初步的介绍，读者主要了解了如下的问题。

1. BAS是什么？(BAS是一种对建筑物中众多分散设备进行管理和控制的系统。)

2. BAS有什么用？(BAS的作用是对暖通空调、给水排水、电力、照明、电梯等设备实施控制与管理，其目标是为用户提供一个既安全可靠、节约能源，又舒适宜人的建筑环境。)

3. BAS的软硬件架构怎样？(BAS主要由中央站、现场控制器、仪表和通信网络组成，其网络结构可划分为管理、控制、现场设备三个网络层。BAS产品都提供强大的软件平台，可方便地实现BAS的网络、数据库、控制器的配置，以及系统监测与管理。)

4. BAS在工程上是如何实施的？(粗线条地介绍了BAS工程实施中的主要环节。)

紧接着，读者会问：BAS的组成设备有哪些？这些设备又是怎样的？本章将对BAS的组成(硬件设备)进行深入介绍。

BAS是一种基于计算机等现代技术的、由软件和硬件组成的自动控制系统。因此，在了解BAS设备前，首先需要掌握一定的自动控制和计算机控制的知识。若修学过自动控制课程的读者，则可略过2.1节的内容。集散控制系统和总线控制系统的架构以及DDC控制器、传感器、执行器等内容是本章的核心内容。在叙述这些理论知识时，还适当穿插介绍了当前楼宇自控市场上主流品牌的产品，这将有助于读者对实际工程应用的了解。

通过本章的介绍，读者将深入了解BAS的硬件设备组成，为BAS在暖通空调、给排水、照明等机电设备中的应用打好基础。


引例

2011年度十大楼宇自控品牌奖隆重揭晓

2011年12月15日晚上，由千家网旗下千家品牌实验室主办的“2011年中国智能建筑品牌奖”颁奖典礼在广州东方宾馆隆重举行。智能建筑领域重量级专家、权威的品牌研究专家、近百家品牌高层、业界主流媒体精英，齐聚一堂，共同见证了智能建筑行业领先企业一年来的辛勤努力所放射出荣耀之光的一刻。其间，“2011年度中国智能建筑十大楼宇自控品牌奖”伴随着璀璨星光新鲜出炉。

“中国智能建筑品牌奖”，被誉为智能建筑行业的“奥斯卡”，是由千家网旗下的千家品牌实验室设立，以全年品牌指数为核心依据，综合市场调查、用户反馈和专家评议产

生，并根据评分进行奖项排名。多年来，以客观、公正、权威让这个智能建筑领域最具历史和影响力的评选始终魅力十足。其最大特点是：排名并非简单地依据销售额，它更多地反映的是年度品牌建设的成就对比，评选过程贯穿全年。同时“中国智能建筑品牌奖”也是优秀品牌引以为豪的重要奖项，成为品牌宣传的重要荣誉。

上海大学自动化系赵哲身教授为荣获本届“十大楼宇自控品牌奖”的企业颁奖。每一个奖项都象征着他们智慧的结晶，更代表了各企业品牌的辛勤努力，希望在今天荣誉的推动下，未来将绽放更多的超越和突破。2011年度十大楼宇自控品牌奖榜单如下。

排名	品牌	企业	排名	品牌	企业
1st	Honeywell	霍尼韦尔 Honeywell	6th	中控·SUPCON	浙江中控研究院有限公司 ZHE JIANG SUPCON RESEARCH CO., LTD
2nd	SIEMENS	西门子 SIEMENS	7th	Techcon	同方泰德国际科技（北京）有限公司 TONGFANG TECHNOVATOR INTERNATIONAL (BEIJING) CO., LTD.
3rd	Johnson Controls	江森自控 Johnson Controls	8th	ASI	爱司艾国际贸易（上海）有限公司 ASI Controls (Shanghai) Ltd.
4th	Schneider Electric	施耐德电子（中国）有限公司 Schneider Electric (China) Co., Ltd.	9th	GREAT	上海格瑞特科技实业有限公司 Shanghai GREAT Science & Technology Co., Ltd
5th	Delta	加拿大Delta控制有限责任公司 Delta Controls	10th	BECKHOFF	德国倍福自动化有限公司 Beckhoff Automation (Shanghai) Co., Ltd

案例小结

熟悉当前楼宇自控市场上的主流产品是工程技术人员开展工作的基础。引例中的新闻报道基本反映了2011年度楼宇自控的市场情况。当然，作为工程技术人员，仅仅知道几个厂商和品牌的名字是不够的。读者不妨深入了解一下各品牌产品的特点，并且掌握至少一个品牌的系列产品的技术细节。本章的内容将为读者深入掌握产品技术细节打好基础。

在工作中，一般都有进一步获取产品技术资料的需要。那么，如何便捷地获取从而提高自己的技术能力呢？一般来说，厂商是非常希望用户你学习和使用他们的产品的。向厂商进行技术咨询是初学者获取产品知识，以提高技术能力的捷径。读者不妨通过电话、电子邮件向厂商咨询，或者索要产品技术手册。本章的学习中将接触DDC、传感器、执行器、系统软件等楼宇自控产品，读者可以试一试向厂商获取这些产品的技术资料。

2.1　计算机控制系统简介

建筑设备自动化控制技术是工业控制技术在建筑领域的延伸。对建筑机电设备运行过程实现自动控制是BAS的基本任务。因此，在深入学习BAS的硬件设备之前，有必要先了解自动控制和计算机控制方面的基础知识。

2.1.1　自动控制系统简介

1. 自动控制系统的组成

简单的自动控制系统的组成一般都用方框图来表示，它由被控对象和自动化装置两大部分组成，如图2.1所示。其中，自动化装置包括测量变送器、控制器和执行器。图2.1中的每个方框均表示自动控制系统的一个组成部分，称为一个环节。各个方框之间用带有箭头的线表示其相互关系，箭头的方向表示信号进入还是离开这个方框，线上的字母表示

相互作用信号。比较机构实际上是控制器的一个部分，为更清楚地表示其比较作用，在图中以⊗或○表示。

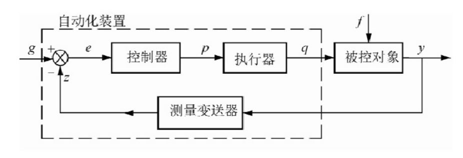


图 2.1　自动控制系统方框图

1）被控对象

在自动控制系统中，需要控制工艺参数的生产设备叫做被控对象，简称对象。空调房间、换热器、空气处理设备、制冷设备、锅炉、供热管网等设备或者设备的某一相应的部分都可以是一个控制系统的对象。

在被控对象中，需要控制一定数值的工艺参数叫做被控变量(y)。被控变量的测量值用字母 z 表示。按生产工艺的要求，被控变量希望保持的具体数值称为设定值(g，也称为给定值或期望值)。被控变量的测量值与设定值之间的差值叫做偏差(e)，$e=g-z$。偏差输入到控制器，经运算决策后输出控制信号(p)。在生产过程中，凡能影响被控变量偏离设定值的种种因素称为干扰(f)。用来克服干扰对被控变量的影响，实现控制作用的参数叫做调节参数(q)，也称为操纵变量。

2）测量变送器

用以感受工艺参数的测量仪表叫测量传感器。如果测量传感器输出的信号与后面仪表所要求的方式不同，则要增加一个把测量信号变换为后面仪表所要求方式的装置，叫做变送器，变送器的输出值就是测量值 z。在 BAS 工程中，常将测量传感器和变送器统称为传感器。

3）控制器

控制器把测量变送器送来的信号与工艺上需要保持的参数设定值相比较，得出偏差 e。根据这个偏差的大小，再按预定的控制算法(或者说控制策略、控制规律)进行运算后，输出相应的特定信号 p 给执行器。预定的控制算法在控制器中执行，是控制系统实现有效控制的核心。控制算法的好坏直接影响整个控制系统的控制精度和性能。控制器可以是机械装置、电子电路器件、计算机系统。BAS 中的 DDC 控制器实际上就是一台计算机。

4）执行器

执行器接受调节器的输出信号，以调节阀门的开启度来改变输送物料或能量的多少，实现对被控变量进行控制。执行器有电动和气动两类。在 BAS 工程中，常用的执行器主要是电动调节阀、电动风门、电磁阀、变频器等。

特别提示

供热、通风、空调、给水、排水、变配电、照明等设备都可以是建筑设备自动化系统的被控对象。在工程实施中，这些被控对象由相应的专业人员来实施。作为楼宇自控专业人员，应在熟悉这些受控对象的工艺流程和工作原理的基础上，设计、配置、调试自动化装置。只有熟悉工艺流程，才谈得上实现优化控制。

2. 负反馈和闭环控制系统

在建筑系统中，绝大多数的受控过程使用闭环控制(Closed-loop Control)。信号沿着箭头的方向传送，最后又回到原来的起点，形成一个闭合的回路，如此循环往复，直到被控对象的被控变量值达到(或接近)设定值为止。我们把这样的控制系统称为闭环控制系统，把系统(或环节)的输出信号直接或经过一些环节重新返回到输入端的做法叫做反馈。在反馈信号 z 旁有一个负号“—”，而在设定值 g 旁有一个正号“+”。如果反馈信号使原来的信号减弱，也就是反馈信号取负值，那么就叫做负反馈。如果反馈信号使原来的信号加强，也就是反馈信号取正值，那么就叫做正反馈。

在闭环自动控制系统中都采用负反馈。因为只有负反馈，才能使被控变量 y 升高时，反馈信号 z 也将升高，经过比较而使偏差信号 p 降低，此时控制器将发出信号，使执行器的调节阀发生相反的变化，进而使被控变量下降回到设定值，这样就达到了控制的目的。而若采用正反馈，则控制作用不仅不能克服干扰的影响，反而会使偏差越来越大，直到被控变量超出安全范围而破坏生产。

知识链接

1. 开环控制系统

若控制器与被控对象之间只有正向控制作用，而没有反馈控制作用，则为开环控制(Open-loop Control)系统，如图 2.2(a)所示。

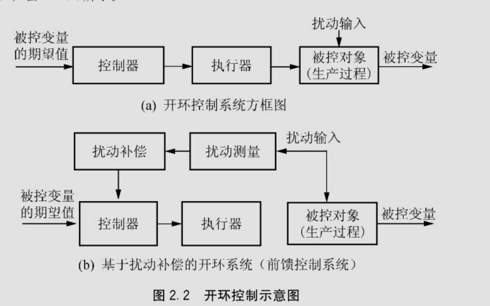


图 2.2 开环控制示意图

在开环系统中，过程的输出(也就是被控变量)由两部分决定：干扰输入和控制输入(如能量、材料等。)控制输入是由执行机构按照控制信号的大小来调节的。根据被控变量的设定值，控制器按照一定的规则产生控制信号。开环控制系统没有考虑扰动的影响，因此，开环控制系统通常在扰动不大和设定值变化较小的情况下才能取得满意的效果。

2. 前馈控制系统

在实际应用中，被控变量因干扰引起的偏差往往很严重。为了在开环系统中减小这种偏差，常采用前馈控制的策略[图 2.2(b)]，即把主要干扰作为控制信号，根据其变化趋势，对操纵变量进行调节，来补偿干扰对被控变量的影响。我们把这样的控制系统称为前馈控制系统。采用这种控制策略需要两方面的条件：一是必须能够测量扰动的大小；二是必须能够估计扰动对被控变量的影响，这样才能够补偿这种影响。准确知道扰动的大小和精确评估它的影响需要很高的成本，有时是不现实的。当然，开环系统很稳定，而且也没有稳定性问题，不像在闭环系统中那样会遇到严重的稳定性问题。

3. 自动控制系统的分类

在分析自动控制系统特性时，常常按照工艺过程需要控制的参数值即设定值是否变化和如何变化来分类，而将闭环自动控制系统分为 3 大类。

(1) 定值控制系统。所谓定值就是设定值恒定而不随时间发生变化。生产过程中，如果被控制的工艺参数保持在一个技术指标上不变，或者说要求工艺参数的设定值不变的自动控制系统就是定值控制系统。

(2) 程序控制系统。被控变量的设定值是变化的，是一个已知的时间函数，即生产技术指标需按一定的时间程序变化的自动控制系统称为程序控制系统。

(3) 随动控制系统。被控变量的设定值在不断地变化，它是某一未知量的函数，而这个变量的变化也是随机的，这样的自动控制系统称为随机控制系统。随机控制系统的作用就是使所控制的工艺参数准确而快速地跟随设定值的变化而变化。

2.1.2 计算机控制系统的简介

1. 计算机控制系统的结构

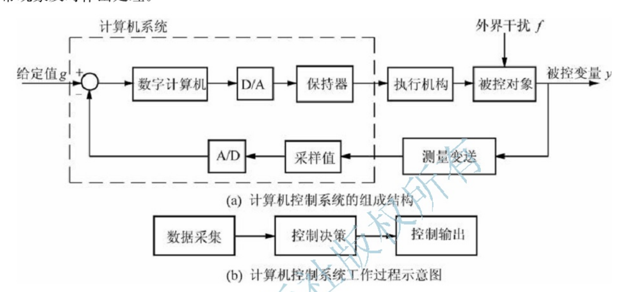
用计算机来代替图 2.1 中的控制器，即构成计算机控制系统，如图 2.3(a)所示。计算机控制系统以计算机系统(虚线框部分)作为控制器，执行控制算法或控制策略。由于计算机的输入和输出信号都是数字信号，因而系统中必须有将模拟信号转换为数字信号的 A/D 转换器，以及将数字信号转换为模拟信号的 D/A 转换器。

在计算机控制系统中，常用的控制器有 DDC 控制器、可编程序控制器(Programable Logic Controller，PLC)、工业控制计算机(Industrial Personal Computer，IPC，简称工控机)、单片机、DSP、智能调节器等。在工程实际中，选择何种控制器，应根据控制规模、工艺要求、控制特点和所完成的工作来确定。

2. 计算机控制系统的工作过程

计算机控制系统工作过程主要分为数据采集、控制决策和控制输出 3 个步骤，如图 2.3(b)。计算机系统按照设定的时间间隔巡回对来自测量变送装置的瞬时值进行数据

采集。然后，对采集到的被控量进行分析和处理，并按预定的控制规律或控制策略，决定将要采取的控制行为。根据控制决策，适时地对执行器发出控制信号，使被控对象按指定规律变化或限定在某一要求的范围内，完成控制任务。数据采集、控制决策和控制输出3个步骤不断重复，使整个系统按照一定的品质指标进行工作，并对被控量和设备本身的异常现象及时作出处理。



(a) 计算机控制系统的组成结构

(b) 计算机控制系统工作过程示意图

图 2.3　计算机控制系统的结构与工作过程

3. 计算机控制系统的硬件和软件

计算机控制系统中的计算机是按工业生产特点和要求而设计的，故也称为工业控制计算机。与普通计算机相比，具有可靠性高、实时性好、环境适应性强、过程输入输出功能强的特点。与普通计算机相同，工业控制计算机也包括硬件和软件两个组成部分。

1）硬件部分

硬件主要包括主机、外围设备、过程输入输出设备、人机交换设备和通信设备等。计算机硬件的作用及功能见表2-1。

表2-1　计算机硬件的作用及功能

<table>
<tr><th colspan="2">硬件名称</th><th>主要部件</th><th>功　能</th><th>作　用</th></tr>
<tr><td colspan="2">主机</td><td>CPU、只读存储器、随机存储器</td><td>输入过程实时信息；自动进行数据处理；发布控制指令及进行控制决策</td><td>计算机控制系统的核心部件，完成系统的信息采集与控制</td></tr>
<tr><td rowspan="2">过程输入输出设备</td><td>模拟量输入通道</td><td>传感器、测量变送器、A/D转换器、接口电路</td><td>采集过程模拟量数据；进行数据变换、放大；进行模/数转换；采集数据送计算机</td><td>采集现场模拟量数据，并进行数据处理</td></tr>
<tr><td>模拟量输出通道</td><td>D/A转换器、执行驱动器</td><td>接受CPU发出的控制信息；进行数/模转换；完成信号放大、驱动；执行控制指令</td><td>对控制设备发出控制信息，并产生控制动作</td></tr>
</table>

续表

硬件名称		主要部件	功能	作用
过程输入输出设备	开关量输入通道	隔离器、缓冲器、接口电路	采集开关量设备数据；进行现场与控制系统隔离；开关量信息送计算机	采集现场开关量数据，并进行数据处理
	开关量输出通道	隔离器、驱动接口电路	接受计算机发出的开关量控制信号；进行现场与控制系统隔离；执行控制指令	对开关设备发出控制信息，并产生控制动作
人机交换设备		键盘、鼠标、打印机、扫描仪、磁盘	输入数据及控制信息；输出数据	人与计算机进行信息交流

2）软件

软件是指计算机运行所需要的各种程序和数据的总和，主要包括系统软件和应用软件两大部分。系统软件是指管理、控制和维护计算机硬件和软件资源的软件，其功能是协调计算机各部件有效地工作或使计算机具有解决某些问题的能力。系统软件主要包括操作系统、程序设计语言、解释和编译系统、数据库管理软件等。应用软件是用户面向生产过程，利用计算机及其提供的系统软件为解决各种实际问题而编制的计算机程序。它包括过程输入程序、过程控制程序、过程输出程序、人机接口程序、打印显示程序和公共子程序等。

计算机控制系统随着硬件技术的高速发展，对软件也提出了更高的要求。只有软件和硬件相互配合，才能发挥计算机的优势，开发出具有更高性能价格比的计算机控制系统。

4. 计算机控制系统的类型

计算机控制系统有操作指导控制系统、直接数字控制系统、计算机监督控制系统、集散控制系统、现场总线控制系统等多种类型。在实际工作中，应根据建筑设备的功能类别、管理要求及建设投资等实际情况，选择合适的计算机控制系统类型。

1）操作指导控制系统

操作指导控制系统是指计算机的输出不直接用来控制生产对象，而只对系统过程参数进行采集、加工处理，然后输出数据，操作人员根据这些数据进行必要的操作，如图 2.4(a)所示。操作指导系统属于开环控制系统结构，具有系统结构简单、造价低的优点，尤其适用于未摸清控制规律的系统。其缺点是需要人工操作，很难适应快速变化的系统，不能同时进行多回路操作。

2）直接数字控制系统

直接数字控制(Direct Digital Control)系统简称 DDC 系统，如图 2.4(b)所示。计算机对多个被控对象进行巡回检测，检测结果与设定值进行比较，再按直接数字控制方法进行控制运算，然后输出到执行机构，对生产过程进行控制。

所谓直接数字控制是以微处理机为基础，不借助模拟仪表而将传感器的输出信号直接输入到微机中，经微机按预先编制的程序处理后直接驱动执行器的控制方式。这种计算机称为直接数字控制器，简称 DDC 控制器。直接数字控制系统可进行多回路控制，灵活性

大，可靠性高，可实现各种复杂控制规律，是全自动控制系统。

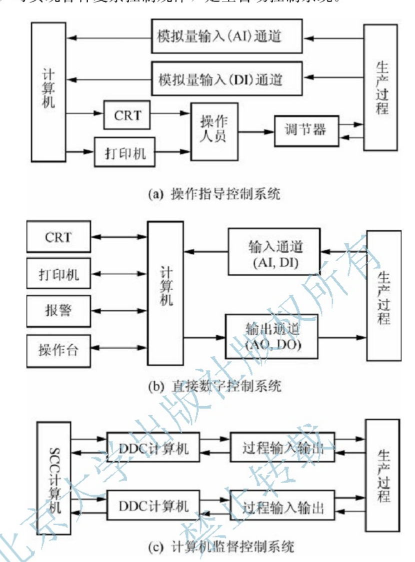


图 2.4 早期的计算机控制系统框图

DDC 系统中的计算机直接承担着控制任务，因而要求实时性好、可靠性高和适应性强。为充分发挥计算机的利用率，一台计算机通常要控制几个或几十个回路，因此必须合理设计应用软件，使之实时地完成所有功能。由于生产现场环境恶劣、干扰频繁，直接威胁着计算机的可靠运行，因此，必须采取抗干扰措施来提高系统的可靠性，使之能适应各种生产环境。

3）计算机监督控制系统

计算机监督控制系统(Supervisory Computer Control，SCC)的构成，如图 2.4(c)所示。SCC 系统通常采用两级计算机，其中 DDC 计算机(称为第一级)完成上述直接数字控制功能；SCC 计算机(称为第二级)则根据反映生产过程工况的数据和数学模型进行必要的计算，给 DDC 计算机提供各种控制信息，比如最佳给定值和最佳控制量等。

DDC 计算机与生产过程连接，直接承担控制任务。因而要求可靠性高、抗干扰强，并能独立工作。SCC 计算机承担高级控制与管理任务，信息存储量大，计算任务重，一般

选用高档微型机或小型机作为SCC计算机。

计算机监督控制系统的特点：系统可根据生产过程的变化，不断地改变设定值，使系统适应生产过程的变化，以达到最优控制的目的。

4）集散控制系统与现场总线控制系统

分别参见2.1.3和2.1.4两小节。

2.1.3 集散控制系统

1. 概述

早期的集中控制系统由一台中央计算机集中处理所有现场状态，对所有被控对象实施控制。一旦中央计算机崩溃，则整个系统将陷入瘫痪。随着生产过程的规模扩大和控制管理要求的提高，集中控制系统的缺点显得尤为突出，已难以满足需要，继而发展起来了集散控制系统(也称为分布控制系统，Distributed Control System，DCS)。

DCS以多台微型计算机取代了集中控制系统的单台计算机，实现对现场设备的分散控制，使得整个系统运算负荷、网络数据通信和故障影响范围均得到分散，同时控制功能直接在现场得以实现，增强了系统的实时响应性。DCS的主要特性是集中管理和分散控制，它是利用计算机、网络技术对整个系统进行集中监视、操作、管理和分散控制的技术。

当前，集散控制系统在工业控制领域和楼宇自动控制领域都得到了广泛应用，成为过程控制领域的主流控制系统。

2. DCS的体系结构

DCS整体上是一种分支型结构，DCS的体系结构如图2.5所示。从垂直结构上看，DCS分为分散过程控制层、集中操作监控层和综合信息管理层，形成从上到下的分级分布控制。每一个层又由具有类似功能的同级设备组成。各层之间由通信网络连接，同层内各设备之间由本层的通信网络进行通信联系。

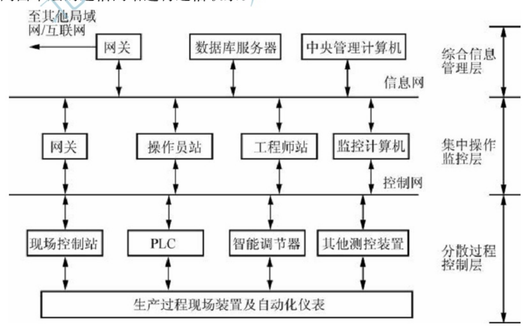


图2.5 DCS的体系结构

1）分散过程控制层

分散过程控制层直接面向生产过程，通过各类现场监控设备完成对现场设备的数据采集、调节控制、顺序控制等功能。输入现场控制站的信号来自生产过程现场的各种传感器、变送器及电气开关的信号。从现场控制站输出的信号用于驱动各类执行机构。分散控制层通过与集中操作监控层间的数据通信，接收操作站下传的参数和作业命令，并将现场工作情况信息整理后向操作站汇报。现场控制站可采用工业控制计算机、可编程序控制器、智能调节器以及其他测控装置。

2）集中操作监控层

集中操作监控层以操作监视为主要任务，兼有部分管理功能，完成显示、操作、记录、报警、组态等功能。由于此层面向操作员和控制系统工程师，因而配备有技术手段齐备、功能强的计算机系统及外部设备，如显示器、键盘和打印机等，需要较大存储容量的硬盘支持及功能强大的软件支持，以确保工程师和操作员对系统进行组态、监视和操作，对生产过程实行高级控制策略、故障诊断、质量评估等。集中操作监控层主要包括监控计算机、工程师站、操作员站等。其中，工程师站主要用于整个控制系统的组态和维护，操作员站用于系统的监视和控制操作，综合信息管理层用于整个系统信息的综合管理和优化控制。

3）综合信息管理层

综合信息管理层由中央管理计算机、数据库服务器等设备构成，通过办公自动化系统、工厂自动化服务系统等软件系统的运行，实现整个企业的综合信息管理。DCS的综合信息管理层实际上是一个管理信息系统(Management Information System，MIS)。

4）通信网络系统

DCS各层之间的信息传输主要依靠通信网络系统来支持。根据各级的不同要求，通信网也分成低速、中速、高速通信网络。低速网络面向分散过程控制层；中速网络面向集中操作监控层；高速网络面向综合信息管理层。

通信网络系统将DCS的各个监控设备、工作站、服务器连接起来，进行数据、指令等信息的传递。

3. DCS的特点

与一般的计算机控制系统相比，DCS具有以下几个特点。

1）硬件积木化

DCS采用积木化硬件组装式结构，系统配置灵活，可以方便地构成多级控制系统。要扩大或缩小系统的规模，只需按要求在系统中增加或拆除部分单元，而系统不会受到任何影响。这样的组合方式，有利于企业分批投资，逐步形成一个在功能和结构上从简单到复杂、从低级到高级的现代化管理系统。

2）软件模块化

DCS为用户提供了丰富的功能软件，用户只需按要求选用即可，大大减少了用户的开发工作量。功能软件主要包括控制软件包、操作显示软件包和报表打印软件包等，并提供至少一种过程控制语言，供用户开发高级的应用软件。

控制软件包为用户提供各种过程控制的功能，主要包括数据采集和处理、控制算法、

常用运算式和控制输出等功能模块。这些功能固化在现场控制站、PLC、智能调节器等装置中，用户可以通过组态方式自由选用这些功能模块，以便构成控制系统。

操作显示软件包为用户提供丰富的人机接口联系功能，并在CRT和键盘组成的操作站上进行集中操作和监视，如总貌显示、分组显示、网络显示、趋势显示、流程显示、报警显示和操作指导等画面，并可以在CRT画面上进行各种操作，可以完全取代常规模拟仪表盘。

报表打印软件包可以向用户提供每小时、班、日、月工作报表，打印瞬时值、累计值、平均值、打印事件报警等。

过程控制语言提供给用户开发高级应用程序，如最优控制、自适应控制、生产和经营管理等。

3）控制系统组态

DCS设计了使用方便的面向问题的语言，为用户提供了数十种常用的运算和控制模块，控制工程师只需按照系统的控制方案，从中任意选择模块，并以填表的方式来定义这些功能模块，进行控制系统的组态。系统的控制组态一般是在操作站上进行的，填表组态方式极大地提高了系统设计的效率，解除了用户使用计算机必须编程的困扰，这也是DCS能够得到广泛应用的原因之一。

4）通信网络的应用

通信网络是集散型控制系统的神经中枢，它将物理上分散配置的多台计算机有机地连接起来，实现了相互协调、资源共享和集中管理。通过高速数据通信线，将现场控制站、局部操作站、监控计算机、中央操作站、管理计算机连接起来，构成多级控制系统。整个集散型控制系统的结构，实质上就是一个网络结构。

5）可靠性高

DCS的可靠性高体现在系统结构、冗余技术、自诊断功能、抗干扰措施可靠性高和元件的高性能。

2.1.4 现场总线控制系统

集散型控制系统还没有从根本上解决系统内部的通信问题和分布式问题，只是以固定集散模式和通信约定构成的自成封闭系统。因此，这种控制系统还很难适应智能大厦种类繁多的设备检测和控制要求。

现场总线技术自20世纪80年代诞生至今，由于它适应了工业控制系统向分散化、网络化、智能化发展的方向，一经产生便成为自动控制技术的热点，由此形成的全分布控制系统——现场总线控制系统(Fieldbus Control System，FCS)，导致了传统控制系统体系结构的变革。FCS是DCS的更新换代产品。

FCS中现场设备多点共享总线，实现通信网络的多信息传输，不仅减少系统线缆，简化系统安装、维护和管理，而且降低系统投资和运行成本，增强系统性能。从物理结构上来说，FCS主要由现场设备(如智能化设备或仪表、现场CPU、外围电路等)与形成系统的传输介质(对绞线、光纤等)组成。现场总线作为底层控制网络，肩负着测量控制的特殊任务，它具有信息传输实时性强、可靠性高、多为短帧传送等特点，传输速率一般在几千字节每秒至10 Mb/s。

1. FCS的体系结构

基于现场总线技术的基本思想，FCS采用总线拓扑结构，如图2.6所示。变送器、控制器、执行器等现场设备构成现场层。站点分主站和从站：上位机(中央监控计算机)、控制器为主站，主站采用令牌总线的介质存取方式；变送器、执行器为从站，从站不占有令牌。FCS的体系结构总体上为令牌加主从的混合介质存取控制方式。

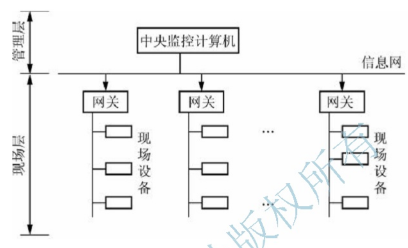


图2.6 FCS的体系结构

传统的DCS的通信网络截止于控制站或输入输出单元，现场仪表仍然是一对一的4～20mA模拟信号传输，如图2.7(a)所示。FCS则把通信线一直延伸到生产现场中的生产设备，构成现场设备或现场仪表互联的现场通信网络，如图2.7(b)所示。FCS通信数据较多，通信速率要求较快的现场总线仪表单元直接连接在H2总线系统上；而其他要求数据通信较慢或实时性要求不高的现场总线仪表单元则全部连接在H1总线系统上。FCS在网络通信中采用了许多防止碰撞、检查纠错的技术措施，实现了高速、双向、多变量、多站点之间的可靠通信。

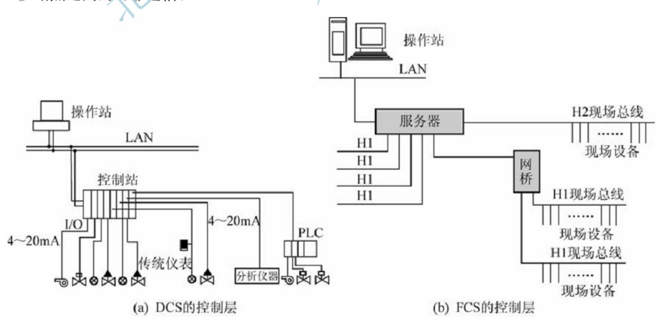


图2.7 DCS的控制层与FCS的控制层的比较

2. FCS的功能

(1) 由上位机或手持编程器进行组态，确定回路构成及参数值，两者均可随时加入或退出系统。

(2) 除控制器的控制功能之外，还可由上位机承担先进的控制运算或优化任务。

(3) 控制器除输出控制变量外，还向上位机传送状态、报警、设定参数变更及各种需要保存的数据信息。

(4) 上位机可监视总线上各站点的运行情况，并保存历史数据。

(5) 网络上各主站的软件均可支持网络组成的变化，具有灵活性。

3. FCS的主要特点

(1) 数字化的信息传输。①底层传感器、执行器、控制器之间是数字信号传输；②底层与上层工作站及高速网之间采用全数字信息交换；③采用防碰撞及检查纠错技术；④可实现高速、双向、多变量、多地点之间的通信。

(2) 分散的系统结构。①将输入/输出单元、控制站的功能分散到智能型现场仪表中；②每个现场仪表作为一个节点，都带CPU单元，可分别独立完成测量、校正、调节、诊断等功能；③任何一个节点出现故障只影响本身而不会危及全局。

(3) 方便的互操作性。①不同厂商的FCS产品可互联；②不同厂商的FCS产品可组成统一的系统，相互操作，统一组态。

(4) 开放的互联网络。①FCS技术及标准是全开放式的；②通信网络可以和其他系统网络或高速网络相连接，用户可共享网络资源。

(5) 多种传输媒介和拓扑结构。①可采用多种传输介质进行通信；②可采用多种网络拓扑结构；③布线工程可节省40%的经费。

特别提示

目前，工程中应用的BAS产品大多是基于DCS的控制系统。这些BAS往往将DCS、FCS和计算机网络等技术相互融合(或者糅杂)在一起。因此，BAS的体系架构往往不是纯粹单一的DCS或FCS。

2.2 DDC控制器

在第1章的“BAS的硬件架构”一节中，介绍了BAS的硬件架构。BAS的硬件设备主要包括传感器、执行器、现场控制器、控制与信息网络及中央管理工作站。现场控制器一般采用直接数字控制器(Direct Digital Controller，DDC)。

2.2.1 DDC控制器简介

1. 概述

DDC控制器，也称为下位机，是一种用于控制管理暖通空调、给排水等设备的、面向生产过程的特殊计算机。DDC控制器可以独立运行，实现对建筑机电设备系统的监控，

可以通过通信接口与其他DDC控制器通信，也可以通过通信网络接受中央管理计算机的统一管理与优化管理，是BAS的核心设备。

1）DDC的硬件和软件

DDC与普通PC计算机相同，同样有中央处理器CPU、ROM、RAM、输入输出接口等设备。DDC的硬件和软件都以一定的标准制成多种类型的模块。在硬件上，DDC与各类传感器、执行器直接相连。在软件方面，DDC配备各类设备控制模式的程序，可以按建筑物的规模与不同设备类型任意组合和扩展，可对建筑设备进行分区控制、最佳起停控制、PID自适应控制、参数趋势记录、报警处理、逻辑及时序控制等。所有这些监控功能均由各类传感器、电动执行装置、阀门等配合DDC控制器共同完成。

在BAS中，一般在上位机以模块组态的方式进行控制程序的编写，编写好的程序经上位机编译后下载至DDC。这些控制程序存储在DDC的存储器中，即使断电也不会丢失。CPU的处理能力和存储器的大小决定了现场控制设备所能处理控制程序的复杂性。

DDC通过通信模块与其他设备进行通信，包括向上位机发送监视状态、接收上位机发出的指令、与同级设备进行互操作以及通过现场控制面板改变部分程序参数等。通信接口根据产品不同可以包括与现场总线的接口、与现场控制面板的接口、与上层控制网络(可以是以太网、中间层控制网络或与通信控制器)的接口等。

2）DDC的结构类型

根据现场应用的情况，DDC的结构有两种基本类型：独立控制器结构和模块化结构。独立结构的控制器是指它的所有输入/输出控制点、电源、CPU、通信接口等均在一台控制器上。而模块化结构的DDC控制器的电源、CPU、输入输出控制点、通信接口等都是模块化结构，具有很好的通用性和扩展性。系统配置时，设计者应根据所监控区域的监控点数量和类型来配置模块的数量和类型。

此外，还有专用于末端设备控制的小型专用DDC(如VAV末端DDC、风机盘管专用DDC等)，以及执行器与控制器一体化的DDC(如执行终端设备控制器)。

3）DDC控制箱

在工程现场，为了防尘、防电磁干扰、安装电源及辅助输入输出设备，应把DDC控制器和电源等设备安装在相应的控制箱(或机柜)内，如图2.8所示。控制箱内一般有多层导轨装置，以供安装电源及各种模块之用。外壳均采用金属材料(如钢板或铝材)，活动部分(如柜门)与机柜主体之间保证有良好的电气连接，从而为内部的电子设备提供完善的电磁屏蔽。为保证电磁屏蔽效果和操作人员的安全，机柜要求电气可靠接地，接地电阻小于4Ω。根据需要，机柜还可以配上散热设备，以保证设备的正常工作温度。

BAS根据需要有时会将几个控制器安装在同一个控制箱内，但从功能上说，每个控制器实际上是一个现场控制站。

2. DDC的输入/输出通道(I/O通道)

DDC控制器与生产过程中的各种过程控制量之间的信息传递，需要通过输入/输出通道(I/O通道)进行。相比较电源、通信接口，I/O通道是DDC控制器中种类最多、数量最大的一类接口，可以达到几十个、上百个。I/O通道是整个BAS与被控对象之间的接口，

直接负责从各种传感器、变送器读入现场状态，并输出信号控制各类执行机构。I/O 通道在两者之间起到纽带和桥梁作用。

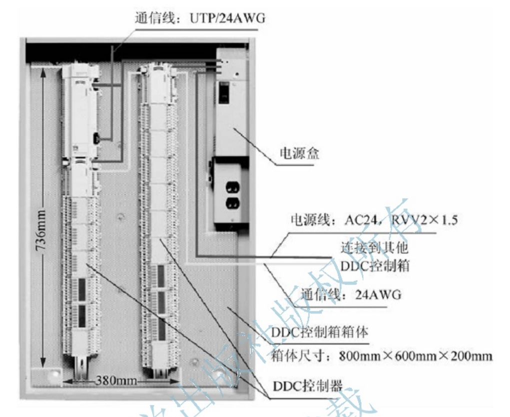


图 2.8　某型号 DDC 控制器及其控制箱

特别提示

DDC 控制器的内部结构非常复杂。但对于楼宇自控技术人员，我们关注的不是 DDC 内部的结构原理，而是 DDC 外部接口的特性，如 I/O 接口、电源接口、通信接口等。这就犹如应用电子技术人员一样，关注的是集成电路芯片的引脚，而不是芯片内部的结构。因此，读者在学习时，不必被 DDC 的复杂结构所吓倒。

DDC 控制器的 I/O 通道有 4 种最基本的类型：模拟量输入通道(AI)、模拟量输出通道(AO)、开关量(或称为数字量)输入通道(DI)、开关量(或称为数字量)输出通道(DO)。

1）DI 通道

DI 通道用来输入各种限位(限值)开关、继电器或阀门连动触点的开、关状态，输入信号可以是交流电压信号、直流电压信号或干接点。由于干接点信号性能稳定，不易受干扰，输入、输出方便，目前应用最广。

与控制器 DI 通道相连接的是以开关状态作为输出的传感器(如水流开关、风速开关或压差开关等)，两者之间采用非屏蔽软线(如 RVV2×1.0)，电路原理如图 2.9 所示。

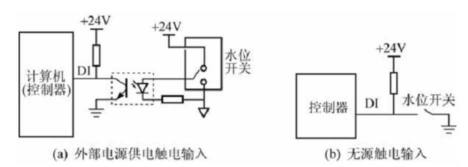


图 2.9　DDC 的 DI 通道的连接电路原理图

DDC 能判断 DI 通道上电平高/低两种状态，并将其转换成数字量“1”或“0”，进而对其进行逻辑分析和计算。DDC 对外部的开关量传感器进行信号采集，一般数字量接口没有接外设或外设是断开状态时，DDC 将其认定为“0”，而当外设开关信号接通时，DDC 将其认定为“1”。

除了测量开关状态，DI 通道还可直接对脉冲信号进行测量，测量脉冲频率或脉冲宽度，或对脉冲个数进行计数。这些功能对常规仪表来说比较困难，但对 DDC 这类计算机控制系统来说，由于它的基本信号处理对象就是“0”、“1”这种开关信号，并且有很准确的时钟，因此很容易高精度地对脉冲进行这种测量。因此，输出脉冲信号的传感器和变送器非常适合于计算机监测控制系统使用。当脉冲的频率不是很高时(10 kHz 以下)，线路传输的抗干扰能力很强，因为它只有“通”、“断”两种状态，小的干扰信号不会对其有任何影响。

2）DO 通道

当外部需要数字量输出时，系统通过 DO 通道提供开关信号，用以控制只具有开、关两种状态的外部设备，如电磁阀、继电器、指示灯、声光报警器等。DO 信号一般以干接点形式输出，要求输出的“1”或“0”对应于干接点的通或断。

如图 2.10(a)所示利用 DO 通道控制一盏 24V 指示灯的电气原理图。但当控制对象所需要的电源为 220V 以上或需要通过较大电流时，DDC 控制器的 DO 端口一般不能直接与控制对象连接成回路，需要借助中间继电器、接触器等设备进行控制。

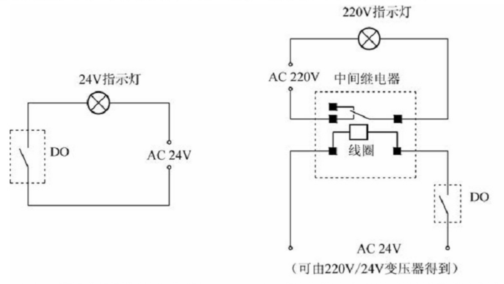


图 2.10　DO 信号控制指示灯电气原理图

如图 2.10(b)所示为通过中间继电器实现 DDC 的 DO 通道控制 220V 回路的原理示意图。当主回路的电流较大时，中间继电器的触点无法承受，这时又需要借助继电器、接触器等。继电器、接触器都是使用小功率信号去控制强电负荷。选择继电器、接触器时需要注意控制参数，如驱动电压、触点对数、触点所能承受和通断的电压/电流等。通过合理地选择、配置，现场控制器可以控制上万伏的高压和上千安的电流回路。

3）AI 通道

DDC 的 AI 通道用来输入模拟量信号。输入的模拟量如温度、压力、流量、液位、空气质量等，这些物理量通过相应的传感器测量，并经过变送器转变为标准的电信号，如 0～10V、4～20mA 等标准信号(一般推荐在传输距离较长时尽可能采用电流信号，以降低线路损耗)。这些标准的电信号进入 DDC 的 AI 通道，经过内部的 A/D 转换器转换成数字量，再由 DDC 进行分析处理。

如果传感器的输出为电压信号，当接收端输入阻抗小，输入电流较大时，信号传输线路的阻抗会造成很大的电压降，这将导致控制器接收端误差很大乃至无效；如果使接收端为高输入阻抗，输入电流较小时，信号传输线路上的电流较小，这将导致线路的抗干扰能力较差。因此，变送器的输出一般不采用电压信号，而采用电流信号。

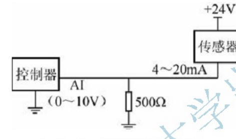


图 2.11 模拟量型传感器与控制器的连接示意图

DDC 控制器的 AI 通道一般是电压测量通道，即它可以测量出接至输入端的电压值。控制器的 AI 通道接收电流信号后，先要将其变换为相应的电压信号，再经过 A/D 转换，将其变为数字量后，由控制器进行分析处理。如图 2.11 所示模拟量型传感器与控制器的连接示意图。

控制器 AI 通道与模拟量传感器之间一般采用屏蔽软线(如 RVVP 2×1.0)连接。

特别提示

许多厂商提供的现场控制设备支持将 AI 通道与 DI 通道通用。这些产品只要在编程时进行设置或在硬件上跳线就可以选择输入信号类型，这种接口称为 UI(通用输入通道)。

4）AO 通道

当外部需要模拟量输出时，系统经过 D/A 转换器转换后变成标准电信号，一般为 DC 4～20mA 标准直流电流信号或 DC 0～10V 标准直流电压信号，有些场合也使用 DC 0～5V 或DC2～10V 电压信号。

AO 通道的输出信号用来控制直行程或角行程电动执行机构的行程，或通过调速装置(如变频调速器)控制各种电动机的转速，亦可通过电/气转换器或电/液转换器来控制各种气动或液动执行机构，例如控制电动阀门的开度等。

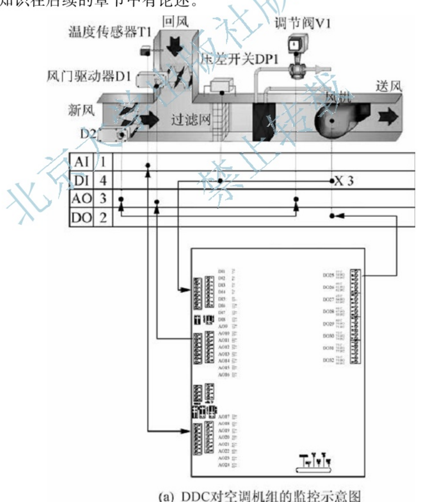
AO 信号一般都可以在电流型和电压型之间转换。这种转换有些可以直接通过软件设置实现，有些则要通过外电路实现，如在 4～20mA 标准直流电流信号输出端接入一个 500Ω 的电阻，电阻的两端就是 DC2～10V 电压信号。

特别提示

用 DO 点控制强电设备时，需要借助继电器、接触器等辅助设备。对于 AI、AO、DI 等输入输出点，也可能存在其所能接受或输出的信号可能与现场传感器、变送器、执行机构等的信号不匹配的情况。这时就需要其他辅助输入输出设备。但这些信号匹配问题一般在设备选型时就予以充分地考虑进行解决了。

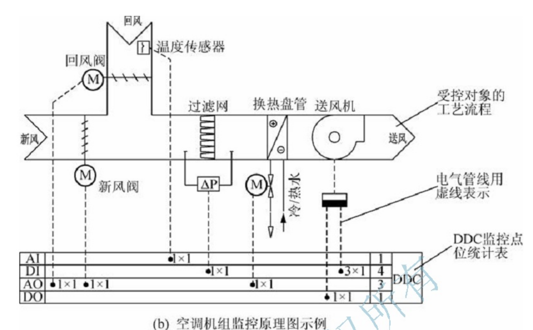
3. DDC 应用举例

如图 2.12(a)所示是 DDC 对空调机组的监控示意图。DDC 利用传感器和检测设备通过 DI、AI 通道监测空调机组的有关数据和状态，DDC 通过 DO、AO 通道将控制命令送给执行机构实施对空调机组的控制。在实际的控制回路中，DDC 一般不直接控制相关设备，而是通过继电器、变频器等类型的辅助控制器件完成动作。工程上，常用监控原理图表示 DDC 对被控对象的监控点位设置情况，如图 2.12(b)所示。监控原理图的上部分是受控对象的工艺流程，下部分是 DDC 监控点位统计表，电器信号常用虚线表示。有关监控原理的详细知识在后续的章节中有论述。



(a) DDC对空调机组的监控示意图

图 2.12 DDC 的工程应用举例



(b) 空调机组监控原理图示例

图 2.12 DDC 的工程应用举例(续)

2.2.2 DDC 控制器产品简介

目前，我国 BAS 市场上应用最广泛的三家公司的 DDC 产品分别是：西门子楼宇科技公司的 DDC，霍尼韦尔公司 Excel 5000 系统的 DDC 和江森自控公司 Metasys 系统的 DDC。关于产品的详细信息则可从生产厂商或代理商获得。

1. 西门子 APOGEE 系统的 DDC 控制器

DDC 控制器是 APOGEE 系统的核心。APOGEE 系统可以没有 Insight 工作站，也可能没有传感器或执行器，但不可能没有 DDC 控制器。Apogee 中常用的 DDC 控制器有模块化设备控制器(Modular Equipment Controller，MEC)、模块化 PXC 控制器(PXC Modular)、紧凑型 PXC 控制器(PXC Compact)，如图 2.13 所示。这些 DDC 控制器在自控层网络(ALN)上的通信采用点对点的方式(Peer to Peer)，通过 ALN 与 Insight 监控软件通信。这些控制器具有的主要功能如下。

(1) 各 DDC 控制器都能够独立工作，按程序和日程表运行，并不依赖于 Insight 服务器和其他 DDC 控制器。

(2) 使用过程控制语言 PPCL(Powers Process Control Language)进行程序编写。

(3) 先进的比例积分微分(PID)暖通空调控制，闭环调节算法，可使振荡最小，并保持精密控制。

(4) 西门子特有的自适应控制(Adaptive Control)算法。闭环控制算法的另一种，能根据对象负载/季节的变化自动进行调节补偿。

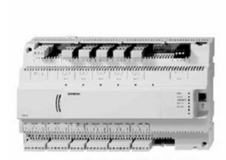
(5) 为能源管理提供了内置的能源管理程序 SSTO(Start/Stop Time Optimization)。

(6) 全面的报警管理、历史数据记录和操作员的控制监视功能。

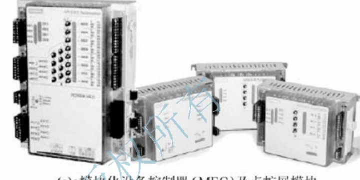
(7) 控制器在掉电情况下，所有设置、数据和程序由内置电池保存。



(a) PXC模块化可编程控制器与TX-I/O输入输出点模块



(b) PXC 紧凑型可编程控制器



(c) 模块化设备控制器(MEC)及点扩展模块

图 2.13 西门子 DDC 控制器的外形图

1）模块化设备控制器(Modular Equipment Controller，MEC)

MEC 在不依靠较高层处理机的情形下，可以独立工作和联网以完成复杂的控制、监视和能源管理功能，而不需依赖更高层的处理器。MEC 可以连接楼层级网络(FLN)设备并提供中央监控功能。

同样，MEC 控制器也内置了 PID 算法及先进的自适应 ADAPTIVE CONTROL 算法和最优化启停(SSTO)的应用程序。MEC 与 PXC 模块化控制器(PXC Modular)的区别在于 MEC 控制器上已配有固定的 I/O 点数，而 PXC 模块化控制器中的 I/O 点数是由设计者在设计时自由选配 I/O 模块而成的。同时 MEC 控制器中的类别也相对较多。MEC 控制器的 I/O 点数的配置特别适用于空调机组的控制。

MEC 控制器目前共有 12 种，所有 MEC 控制器 I/O 点均为 32 点。其中 MEC-1XX 系列不能扩展 I/O 点数，MEC-X1X 系列配有手动/停止/自动(HOA)切换开关，MEC-3XX 系列支持 MODEM 拨号功能，MEC-XXXF 系列支持多达 3 条楼层级网络(FLN)，而其余的 MEC 控制器则只能通过 MEC 点扩展总线(EXP)连接最多达 8 个点的扩展模块。

2）PXC 控制器

西门子模块化控制器(PXC)是 Apogee 现场管理和控制系统的新成员，同样是一个高性能的直接数字控制器(DDC)。采用点对点(Peer to Peer)的通信方式，ALN 网络可以是 TCP/IP 的以太网或 RS-485 网络。PXC 系列控制器是一款技术先进、结构紧凑、组合灵活、扩展方便的 DDC 控制器组合。该系列控制器又可主要分成 PXC Compact(紧凑型 PXC)以及 PXC Modular(模块化 PXC)两种类型，其中紧凑型 PXC 自身带有输入输出点，带 F 型号的支持一条 FLN 网络，带 R 型号的适应室外使用；模块化 PXC 自身不带输入输出点，可通过总线进行扩展。PXC 系列控制器分类如图 2.14 所示。

- PXC系列控制器
  - PXC模块化可编程控制器
    - 自组总线：支持多达64个模块/500点
    - 扩展总线：支持更多的I/O点（通过3条楼层级扩展）
  - PXC紧凑型可编程控制器
    - PXC 16：紧凑型控制器，固定16点
    - PXC 24：紧凑型控制器，固定24点

图 2.14 PXC 系列控制器分类

PXC Compact 控制器具有大量的通用输入输出点，采用先进的 TX-I/O 技术，可以通过软件设定信号的类型。可以选择相应的机型安装在室外温度要求较高的环境。根据使用情况不同，主要可以提供 16 点和 24 点两种以供选择，从而满足不同成本的需求。

PXC Modular 控制器除上述特点外，还可以实现在自组总线上添加 TX-I/O 模块和一个 TX-I/O 电源的情况下，PXC Modular 系列可以控制 500 个点。

此外，通过扩展模块，PXC Modular 系列还可以对分散在 FLN 上的设备进行监控。PXC Modular 系列扩展模块提供了与 FLN 设备的硬件连接。使用 RS－485 扩展模块，PXC ModularR 系列支持 3 条 RS－485 的 FLN 上的设备，一共可以连接 96 个 FLN 设备，从而实现 FLN 上的点位扩展。

TX-I/O 系列扩展模块由模块本身和终端底部组成。模块通过与 PXC Modular 的通信来完成 A/D 或是 D/A 的转换，信号处理，对点的监测和输出指令。终端底部提供了现场总线的接线端子和对自组总线的通信。

TX-I/O 电源模块提供了 TX-I/O 模块和外围设备的电源。多个电源模块的并行使用可以满足对大量 I/O 点控制的供电需要。

3）扩展模块

西门子点扩展模块(PXM)提供有效的方法来控制和监视远程信息点。作为现场控制器的扩展，该项功能可以扩展 Apogee 控制系统点的容量并使点的位置更接近于传感器和负载，终端模块的可移动性使现场布线更容易。

PXM 与 MEC 点扩展总线(EXP)和其他楼层级网络(FLN)现场控制器兼容，通信速率为 4.8～38.4kbit/s。

PXM 目前共有 7 种，配有手动/停止/自动(HOA)切换开关各 3 种，其中模拟点扩展模块一种，为 4 点 AI 和 4 点 AO，数字点扩展模块两种，为 4 点 DI 和 4 点 DO，8 点 DI 和 4 点 DO；此外，还可以提供 8 点 AI 的扩展模块。

模拟量输入点(AI)支持 0～10V，4～20mA 或 1KRTD(1000Ω 标准铂热电阻温度传感器)3 种方式，且可作开关量输入点(DI)使用。而数字量输入点为干接触点并可用作脉冲累加器点，数字量输出点支持 AC 110/220V 继电器。数字点模块的 DI 和 DO 点的开关状态均由 LED 显示。

2. 霍尼韦尔公司 Excel 5000 系统的 DDC

霍尼韦尔公司提供的 IBMS 建筑集成管理平台被称为 EBI 系统，如图 2.15 所示。EBI 系统是一套基于客户机/服务器和浏览器/服务器网络结构的控制网络软件，用于完成网络

组建、网络数据传送、网络管理和系统集成等功能。

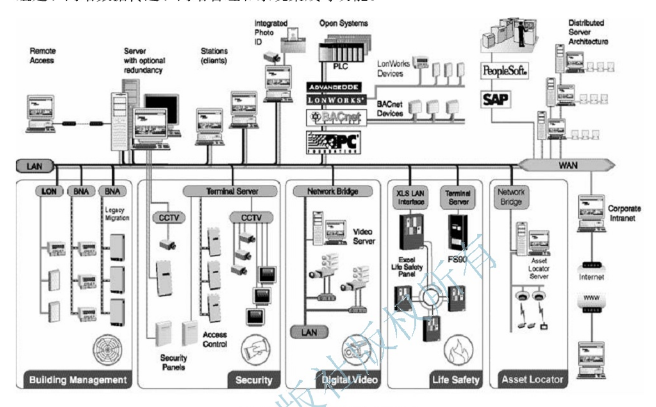


图 2.15 EBI 系统的网络结构

EBI 平台除了服务器(含数据库)软件、客户机软件、开放系统接口软件以外，还有 6 个并列的应用软件系统：建筑设备监控系统、节能管理系统、火灾报警和消防联动系统、安全防范系统、数字视频监控系统、资产定位系统。

霍尼韦尔 EBI 系统中的建筑设备监控系统称为 Excel 5000 系统。逻辑上，Excel 5000 系统是典型的三层网络控制系统，包括管理层网络、控制层网络、现场层网络，各层网络之间使用不同的网络设备把三层网络连接成为一个整体，Excel 5000 系统的组成如图 2.16 所示。



图 2.16 Excel 5000 系统的组成



Excel 800、XL50 控制器的外形及说明见表 2-2。

表 2-2　霍尼韦尔公司 Excel 5000 系统的控制器

名　　称	产品图片	备注/说明
XL50 控制器		可用于 HVAC 系统及空调设备控制，适用于中小型建筑物，可作为独立的控制器使用，也可集成到 Excel 5000 系统或开放式 LonWorks 网络上，与 Excel 10 控制器或第三方产品进行通信
Excel 800 控制器		Excel 800 控制器提供了针对加热、通风和空调(HVAC)系统的、高性能价格比的自由编程控制。它在能源管理方面也有广泛的应用，包括最优化启停、夜间送风以及最大负荷需求等
Panel 总线分布式输入输出模块		—
Excel Smart I/O 分布式输入/输出模块		经 LonMark 认证，用于 Excel 800、Excel 50 或开放式 LON 系统中第三方控制器的输入输出

3. 江森自控公司 Metasys 系统的 DDC

Metasys 楼宇自控系统由中央操作站、网络控制器、直接数字控制器等组成。Metasys 系统属于两层网络系统，通过 Ethernet 网(N1 网)将中央操作站及网络控制器各节点连接起来，Ethernet/IP 使用标准的网络硬件在网络控制器与用户操作站之间完善地传递信息。同时安装在建筑物各处的直接数字控制器(DDC)将通过现场总线(N2 网)连接到网络控制器上，与其他网络控制器上的直接数字控制器及中央操作站保持紧密联系。现场需监控设备上的传感器及执行器等连接至以上各直接数字控制器内，从而实现分散控制、集中管理。

Metasys 系统的架构如图 2.17 所示，Metasys 系统的组成如下。

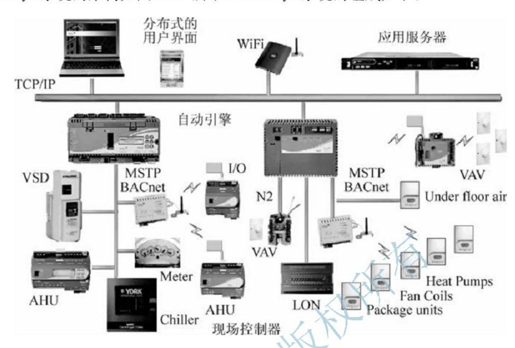


图 2.17 Metasys 系统的架构

1）中央操作站

中央操作站的特征是多屏显示、现存图形的重复利用、动画界面、采用颜色梯度的动态信号、动作趋势。

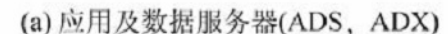
2）网络控制器

网络控制器是一种模块式、智能化的控制盘，为 Metasys 网络的心脏。通过多个网络控制器，即可将大楼每一个侧面的管理情况紧密地连接起来，进行全面、综合的管理。最新的 Metasys 系统以网络控制引擎(Network Automation Engine，NAE)作为核心管理整个系统。NAE 是内嵌 Windows 操作系统和楼宇管理软件的智能硬件，向下支持控制领域的 RS-485、LonWorks、BACnet 总线技术，向上通过 XML Web Service 提供 B/S 的软件结构以及与信息系统集成的能力。

3）直接数字控制器

直接数字控制器是 Metasys 系统的最前端装置，直接与大楼内有关的设施相连接，再通过 N2 总线与网络控制器相连，网络控制器与中央操作站均可对其实现超越控制。江森自控公司 Metasys 系统 DDC 及网络控制器如图 2.18 所示。





(a) 应用及数据服务器(ADS，ADX)



(b) 网络自动化引擎(NAE)

图 2.18 江森自控公司 Metasys 系统 DDC 及网络控制器



(c) 网络控制引擎(NCE)



(d) FEC控制器



(e) FX15电子控制器配合MUI型LCD显示器



(f) FX05 数字控制器

图 2.18 江森自控公司 Metasys 系统 DDC 及网络控制器(续)

2.2.3 控制规律

所谓控制规律是指当控制器接收了偏差信号(即输入信号)以后，它的输出信号(即控制信号)的变化规律。控制器就是按照人们规定好的控制规律动作的。在建筑系统中，绝大多数的受控过程使用闭环控制。为了保证闭环回路的稳定，控制器需要采用合适的控制规律。

在建筑设备的自动化系统中，常用的最基本的控制规律有双位控制、比例(P)控制、积分(I)控制、微分(D)控制。其中积分控制和微分控制不单独使用，往往与比例控制组合为 PI 控制和 PID 控制。在建筑系统中，大多数的闭环控制回路采用比例积分微分(PID)控制。

1. 双位控制

双位控制规律就是根据偏差值的正/负，控制器输出两个不同的开关控制信号。双位控制规律可以用下述数学式来表示：

$$p=\begin{cases}+1(\text{on}) & e>0 \quad (\text{或 } e<0)\\ -1(\text{off}) & e<0 \quad (\text{或 } e>0)\end{cases}$$

式中 p——双位控制器的输出，取开(+1，on)、关(−1 或 0，off)两种状态；

e——偏差值。

双位控制规律是最简单的控制形式，它的作用是不连续的，双位控制只有两个输出值，相应执行器的调节机构也只有开和关两个极限位置。



双位控制系统机构简单，动作可靠，在空调系统中应用广泛。空调系统中的风机盘管温控器就是典型的双位调节，如图 2.19 所示。

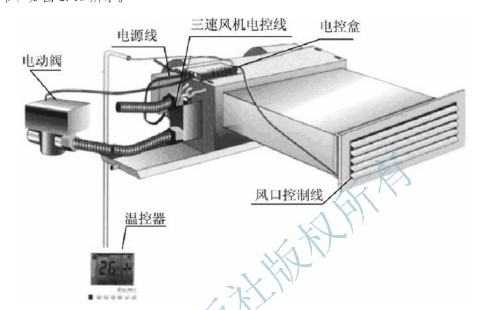


图 2.19 风机盘管空调系统中温度的双位控制

室内温度由室内温度传感器检测。以夏天为例，温控器工作在制冷模式下，当室内温度超过设定值时，温控器立即开通冷冻水电动两通阀，室温下降；当室内温度低于设定值时，温控器立即关闭电动两通阀，停止冷冻水供应，室温上升。电动两通阀在温控器的作用下只有开和关两种状态。通过这种简单的双位调节就实现了室内温度的自动控制作用。

理想的双位控制特性如图 2.20(a)所示，其开关位置的变换在时间上是很快的，对象中的物料量或能量总是处于不平衡状态，被控变量始终不能真正稳定在设定值上，而是在设定值附近上下波动。

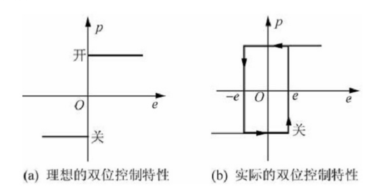


图 2.20 双位控制特性曲线

实际的双位控制器都有一个中间区(呆滞区)。实际的双位控制特性如图 2.20(b)所示。如果被控制量对设定值的偏差不超出呆滞区，调节器的输出状态将保持不变。当偏差上升至高于设定值的某一数值后，调节器输出状态才变化，调节机构才开；当偏差下降至

低于设定值的某一数值后，调节器输出状态又变化，调节机构才关。这样，调节机构开关的频繁程度便大为降低，减少了器件的损坏。实际的双位控制是一个等幅振荡过程，被控变量在呆滞区内随时间变化的曲线如图 2.21 所示。

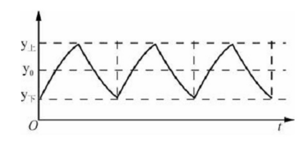


图 2.21　具有中间区的双位控制过程

衡量双位控制过程的优劣，一般采用振幅与周期作为品质指标。双位控制的精度往往不高，只能适用于控制要求不高的场合。

除了双位控制外，还有三位(即具有两个中间区)或更多位的。包括双位在内，把这一类控制规律统称为位式控制，它们的作用原理基本上一样。

2. 比例控制

对于根据偏差信号来决定控制器输出的问题，人们会很自然地想到这样的策略：当误差信号小时选择一个小的输出；当误差信号大时选择一个大的输出。控制器的输出与输入成比例，这样的控制规律就是比例(Proportional)控制。其数学表示式为：

$$\Delta p = K_p e$$

式中　Δp——控制器的输出变化量；

e——控制器的输入偏差信号，即设定值与测量值之间的偏差；

K_p——比例控制器的放大倍数，也称为比例增益。

当比例增益 $K_p > 1$ 时，比例作用为放大；而当比例增益 $K_p < 1$ 时，比例作用为缩小。

控制器的输出在理论上可以取任何值。对应于一定的比例增益 K_p，比例 K 控制器的输入偏差大，输出变化量也大；输入偏差小，相应的输出变化也小。但在实际应用中，控制器的输出被限制在一个有限的范围内。比如，阀门只能从全开到全关。这种特性可以被当做饱和特性。它产生的输入输出曲线可以用如图 2.22 所示来描述。

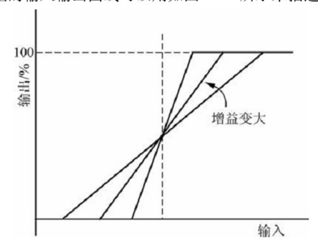


图 2.22　输出受限而具有饱和特性时的比例控制器的输入/输出特性

通常情况下，比例控制器有两个可调的变量，一个变量是被控变量的设定值；另一个是比例增益。在实际的控制器中很方便提供设定值的旋钮(数字控制器可提供设定值的显示和调节键)，而比例增益则习惯上以比例带来代替。

所谓比例带(或称为比例度)指控制器输入的变化与相应输出变化的百分数，可表示为：

$$\delta=\left(\frac{e}{z_{\max}-z_{\min}}/\frac{\Delta p}{p_{\max}-p_{\min}}\right)\times100\%=\frac{e}{\Delta p}\cdot\frac{p_{\max}-p_{\min}}{z_{\max}-z_{\min}}\times100\%=\frac{1}{K_{p}}\cdot\frac{p_{\max}-p_{\min}}{z_{\max}-z_{\min}}\times100\%$$

式中　e ——输入变化量；

Δp ——输出变化量；

$z_{\max}-z_{\min}$——测量值的刻度范围；

$p_{\max}-p_{\min}$——控制器输出的工作范围。

由上式可以看出，比例带就是使控制器的输出变化满刻度时(也就是调节阀从全关到全开或相反)，相应的仪表指针变化占仪表测量范围的百分数，或者说使控制器输出变化满刻度时，输入偏差对应于指示刻度的百分数。只有当被调量处在这个范围以内，调节阀的开度(变化)才与偏差成比例。超出比例带以外，控制器的输入/输出已不再保持比例关系，而控制器至少也暂时失去其控制作用了。

上式也说明比例带 δ 与比例增益 K_{p} 互为倒数关系。δ 越大，使输出变化全范围时所需的输入偏差变化区间也就越大，而比例放大作用就越弱(K_{p}越小)，反之亦然。因此，δ 可表示比例控制器的灵敏度。δ 越大，则控制器的灵敏度越低，反之则越高。



比例带计算及其物理意义示例

已知一个比例温度控制器的温度刻度范围是 50～100℃，控制器的输出是 0～10mA。当指示指针从 70℃移到 80℃时，调节器相应的输出电流从 3mA 变化到 8mA，则该比例控制器的比例带 $\delta=\left(\frac{80-70}{100-50}/\frac{8-3}{10-0}\right)\times100\%=40\%$。因此，对于该温控器，当温度变化全量程的 40%时，调节器的输出从 0mA 变化到 10mA。在这个范围内，温度的变化 e 和输出变化 Δp 是成比例的。但当温度变化超过全量程的 40%时(即温度变化超过 20℃时)，控制器的输出就不能再跟着变化了，调节器的输出最多只能变化 100%。

当干扰出现时，调节器的比例带 δ 不同，则控制过程的变化情况亦不同，比例度对控制过程的影响如图 2.23 所示。由图可见，δ 越大，过渡过程曲线越平稳，但静差很大。δ 越小，则过渡过程曲线越振荡。当 $\delta<\delta_{k}$(临界值)时，比例控制作用太强，在干扰产生后，被控变量将出现发散振荡(如曲线 1 所示)，这是很危险的。当 δ 太大时，控制器的输出变化很小，调节阀开度改变很小，被控变量的变化很缓慢，比例控制作用太小(如曲线 6 所示)。生产通常要求比较平稳而静差又不太大的控制过程(如曲线 4 所示)。

选择合适的比例带 δ，可以使比例控制作用适当，被控变量的最大偏差和静差都不太大，过渡过程稳定得快，一般只有两个波，控制时间短。一般情况下比例带的大致范围

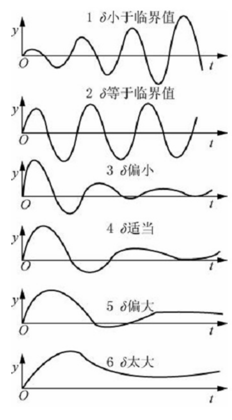


图 2.23 比例度对过渡过程的影响

为：压力对象 30％～70％；流量对象 40％～100％；液位对象 20％～80％；温度对象 20％～60％。

比例控制器具有调节速度快，控制及时的优点。但是它在被控变量达到稳定时有残余的偏差(余差)，被控变量不能回到原来的给定值。特别是在负荷变化幅度较大或干扰很大时，残余偏差值会更大。控制结果有余差是比例控制的主要缺点。因此，比例控制只能应用于干扰小、对象的纯滞后较小而时间常数并不太小，控制质量要求不高，允许有余差的场所。

3. 比例积分控制

对于工艺要求较高，余差不允许存在的情况，比例控制器不能满足要求。为了消除余差，需要引入积分控制作用，构成比例积分(PI)控制规律。

1) 积分控制

如果控制器的输出变化量 Δp 与输入偏差 e 的积分成比例关系，则称为积分控制规律，一般用字母 I 表示。其数学表示式为：

$$\Delta p = K_{\mathrm{I}}\int e\mathrm{d}t = \frac{1}{T_{\mathrm{I}}}\int e\mathrm{d}t \text{ 或 } \frac{\mathrm{d}\Delta p}{\mathrm{d}t} = K_{\mathrm{I}}\,e = \frac{1}{T_{\mathrm{I}}}e$$

式中 K_{I}——积分比例系数，称为积分速度；

T_{I}——积分时间($T_{\mathrm{I}}=1/K_{\mathrm{I}}$)。

积分时间是一个以单位为时间的参数，它决定了积分控制作用的强度。积分时间越小，积分作用越强。

阶跃输入时积分控制的特性如图 2.24 所示。在阶跃输入偏差信号的作用下，积分控制器的输出是一直线，其斜率为 K_{I}。只要偏差存在，积分调节器的输出将随着时间延长而不断增大(或缩小)。

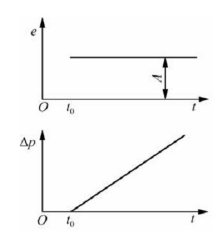


图 2.24 阶跃输入时积分控制的动态特性

积分控制规律的特点是只要偏差存在，控制器输出就会变化，调节机构就要动作。直

至偏差 $e=0$，输出信号才不再继续变化，调节机构才停止动作，系统才可能稳定下来。积分控制作用在最后达到稳定时，偏差必等于零。因此，积分作用可以消除余差。

积分控制能够消除余差，但它的输出变化不能较快地跟随偏差的变化而变化，总是落后于偏差的变化，作用缓慢，波动较大，不易稳定。积分控制规律只能用于具有自衡特性的被控对象，自衡能力越大，调节效果越好。

2）比例积分控制规律

单纯的积分控制作用使控制过程缓慢，并带来一定程度的振荡。因此，积分控制很少单独使用，一般都和比例控制作用组合在一起，构成比例积分控制规律，用字母 PI 表示。

比例积分控制规律的数学表达式为：

$$\Delta p = K_{\mathrm{p}}\left(e+\frac{1}{T_{\mathrm{I}}}\int e\mathrm{d}t\right)=\frac{1}{\delta}\left(e+\frac{1}{T_{\mathrm{I}}}\int e\mathrm{d}t\right)$$

上式表明，比例积分控制器的输出是比例控制和积分控制两部分的作用之和。其动态特性如图 2.25 所示。Δp 的变化一开始是一个阶跃变化，这是比例作用的结果，然后随时间逐渐上升，这是积分作用的结果。在比例积分控制中，比例作用是及时的、快速的，而积分作用是缓慢的、渐近的。因此比例积分控制具有控制及时、克服偏差，又克服余差的性能。但是，引入积分作用后，虽然消除了余差，但也降低了系统的稳定性。因此，对于比例积分控制，需要选择合适的比例带和积分时间。

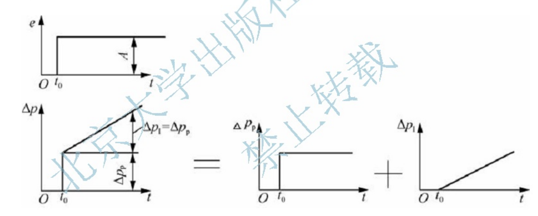


图 2.25 阶跃输入后比例积分控制的动态特性

3）积分时间对控制过程的影响

在比例积分控制器中，比例带和积分时间都是可以调整的。积分时间对过渡过程的影响具有两重性。在同样的比例带下，积分时间 T_{I} 对过渡过程的影响如图 2.26 所示。积分时间 T_{I} 越小，表示积分速度 K_{I} 越快，积分特性曲线的斜率越大，即积分作用越强。一方面克服余差的能力增加，这是有利的一面；但另一方面会使过程振荡加剧，稳定性降低（见曲线 1）。积分时间 T_{I} 越短，振荡倾向越强烈，甚至会成为不稳定的发散振荡，这是不利的一面。反之，积分时间 T_{I} 越大，表示积分作用越弱，余差消除越慢（见曲线 3）；若积分时间为无穷大，积分作用很微弱，则表示没有积分作用，就成为纯比例调节器（见曲线 4）。只有当 T_{I} 适当时，过渡过程才能较快地衰减，而且没有余差（见曲线 2）。

由于积分作用会加强振荡，这种振荡对于滞后大的对象更为明显，所以控制器的积分时间应按控制对象的特性来选择，对于管道压力、流量等滞后不大的对象，T_{I} 可选得小

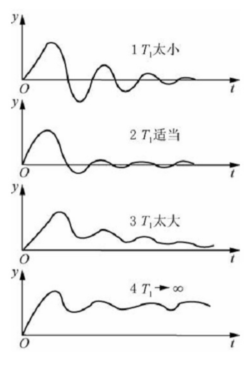


图 2.26　积分时间对过渡过程的影响

些，温度对象的滞后较大，T_I可选大些，如压力控制，$T_I=0.4\sim3$min；流量控制，$T_I=0.4\sim3$min；温度控制，$T_I=3\sim10$min。

4）积分饱和

具有积分作用的调节器，只要被调量与设定值之间有偏差，其输出就会不停地变化。如果由于某种原因(如阀门关闭、泵故障等)，被调量偏差一时无法消除，然而调节器还是要试图校正这个偏差，结果经过一段时间后，调节器输出将进入深度饱和状态，这种现象称为积分饱和。进入深度积分饱和的调节器，要等被调量偏差反向以后才慢慢从饱和状态中退出来，重新恢复控制作用。这将有可能造成不良后果。

防止积分饱和现象有3种方法：第一种方法是对控制器的输出加以限幅，使其不超过额定的最大值或最小值；第二种方法是限制控制器积分部分的输出，使之不超出限值；第三种方法是采用积分切除法，即在控制器的输出超过某一限值时，将控制器的控制规律由比例积分自动切换成比例控制状态。

4. 比例微分控制

对于滞后很大或负荷变化剧烈的对象，采用比例积分控制可以消除余差，但会产生超调的问题。而且，偏差的变化越快，产生的超调就越大，需要越长的控制时间。在这种情况下，可以引入微分控制。微分作用可以根据偏差变化速度提前采取行动，具有“超前”作用，因而能比较有效地改善容量滞后比较大的控制对象的控制质量。

1）微分控制

如果控制器输出的变化与偏差的变化速度成正比例关系，则称作微分控制规律，一般用字母D表示。其数学表达式为：

$$\Delta p=K_D\frac{\mathrm{d}e}{\mathrm{d}t}$$

式中　Δp——控制器输出的变化；

　　K_D——微分比例系数。

该式表明，偏差变化的速度越大，则控制器的输出变化也越大，即微分作用的输出大小与偏差变化的速度成正比。对于一个固定不变的偏差，不管这个偏差有多大，微分作用的输出总是零，这是微分作用的特点。

如果控制器的输入是一个阶跃信号，则微分控制器的输出如图2.27(a)所示。在输入变化的瞬间，输出趋于无穷大，在此以后，由于输入量不再变化，输出立即降到零。在实际工作中，要实现图2.27(b)所示的控制作用是很难的或不可能的，也没有实用价值，这

种控制称为理想微分控制作用。图 2.27(c)是一种近似的微分作用，在阶跃输入发生时刻，输出 Δp 突然上升到一个较大的限数值，然后呈指数规律衰减直到零。

2）比例微分控制规律

在偏差存在但不变化时，微分作用都没有输出，它对恒定不变的偏差是没有克服能力的，因此，微分控制器不能作为一个单独的控制器使用。在实际上，微分控制作用总是与比例作用或比例积分控制作用同时使用，构成比例微分控制规律或比例积分微分控制规律。

比例微分控制规律用字母 PD 表示，其数学表达式为：

$$\Delta p = K_P e + K_D \frac{\mathrm{d}e}{\mathrm{d}t} = \frac{1}{\delta}\left(e + T_D \frac{\mathrm{d}e}{\mathrm{d}t}\right)$$

其中，$T_D = \delta K_D$，称为微分时间。

上式表明，比例积分控制器的输出是比例控制和微分控制这两部分的作用之和。改变比例带 δ 和微分时间 T_D 可分别改变比例作用和微分作用的强弱。

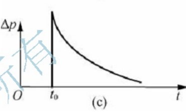


图 2.27　阶跃输入时，微分控制的动态特性

实际的比例微分控制器的比例带 δ 的大小是不能改变的，固定为 100%。当输入量是一幅值为 A 的阶跃信号时，Δp 等于比例输出 Δp_P 与近似微分输出 Δp_D 之和，可用下式表示：

$$\Delta p = \Delta p_P + \Delta p_D = A + A(K_D - 1)\mathrm{e}^{-\frac{K_D}{T_D}(t-t_0)}$$

特别提示

注意该式中的 e 的印刷体是正体的，不是斜体的。此处的 e 是一个常数(约等于 2.72)，而不代表偏差。偏差 e 是一个变量，印刷成斜体。

实际的比例微分控制的特性如图 2.28 所示。微分控制器在受到阶跃输入的作用后，在 $t-t_0=0$ 时，$\Delta p_D = A(K_D - 1)$，表明微分部分输出一开始跳跃一下，微分作用最大。

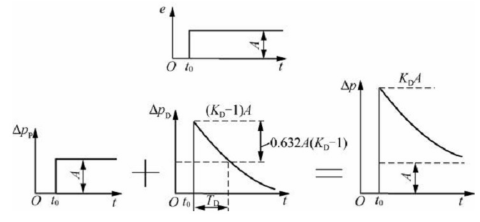


图 2.28　阶跃输入时比例微分控制的动态特性

然后慢慢下降，在 $t-t_0=T_D/K_D$ 时，$\Delta p_D=0.368A(K_D-1)$，微分部分的输出下降到微分作用最大输出的 36.8%。我们把这段时间称为时间常数，用 T_s 来表示，则微分时间 T_D 为时间常数 T_s 和微分放大倍数 K_D 的乘积，即 $T_D=K_DT_s$。

3）微分时间对过渡过程的影响

控制器的微分时间 T_D 是一个以时间为单位的参数。它决定了微分作用的强度。一个大的微分时间产生强的微分作用。对于一个比例微分控制器，通过改变 T_D 的大小可以改变微分作用的强弱。

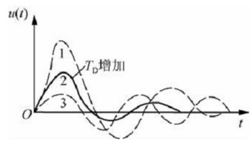


图 2.29　T_D 对过渡过程的影响

微分作用的强弱要适当。如果微分作用太弱，即微分时间 T_D 太小，调节作用不够明显，对控制质量改善不大；但是微分时间 T_D 太大，又会使调节作用过强，从而引起被控变量大幅度振荡，不但不能提高系统的稳定程度，反而会使其降低，如图 2.29 所示是在比例带相同的情况下，采用不同微分时间时的过渡过程曲线。

由于微分作用是根据偏差的变化速度来控制的，在扰动作用的瞬间，尽管开始偏差小，但如果它的变化速度较快，则微分调节器就有较大的输出，它的作用较之比例作用还要及时，还要大。对于滞后较大、负荷变化较快的对象，当较大的干扰施加以后，因对象的惯性，偏差在开始一段时间内都是比较小的。如果仅采用比例控制作用，则偏差小，控制作用也小，这样一来，控制作用就不能通过及时地加大来克服干扰作用的影响。如果加入微分作用，就可在偏差尽管不大，但偏差开始剧烈变化的时刻，立即产生一个较大的控制作用，及时抑制偏差的继续增长。所以，微分作用具有一种抓住“苗头”预先控制的作用，这是一种“超前”的作用，因此称为“超前控制”。

一般说来，由于微分控制的“超前”控制作用，它能够改善系统的控制质量，对于一些滞后较大的对象(例如温度对象)特别适用。

5. 比例积分微分控制

1）比例积分微分控制规律及其特点

对于比例控制，其控制结果会存在余差，即在设定值和被控变量间存在一个差值。在大多数情况下，可以通过减小比例带，将偏差减小到可接受的范围。但这等于增加了控制器的增益 K_P。增加控制器的增益会带来振荡和不稳定，这种现象限制了比例控制单独使用时的控制精度的提高。如果需要更好的控制效果，则需要引入其他的方法与之一起使用。

积分控制和微分控制可以给比例控制提供附加的协助，以减少余差和加快反应速度。积分作用产生一个与偏差信号在时间上的积累成比例的控制信号。连续的偏差会最终形成校正作用，这种校正作用持续累积直到余差消除。微分作用产生一个与偏差信号在时间上的导数或瞬时变化率成比例的信号。微分作用对于稳态偏差并不起作用，但是，它可以让

控制器使用一个更大的比例增益，并且更早地根据偏差的变化趋势产生一个校正作用，进行“超前控制”。

大多数数字控制器同时使用比例、积分和微分这三种控制规律，来发挥它们各自的优点。这就是比例积分微分控制规律，简称为三作用控制规律，用 PID 表示。其数学表达式为：

$$\Delta p = \frac{1}{\delta}\left(e + \frac{1}{T_{\mathrm{I}}}\int e\mathrm{d}t + T_{\mathrm{D}}\frac{\mathrm{d}e}{\mathrm{d}t}\right)$$

在阶跃偏差信号输入时，PID 控制的输出动态特性如图 2.30 所示。PID 控制器在阶跃输入后，开始时，微分作用的输出变化最大，使总的输出大幅度地变化，产生一个强烈的“超前”控制作用，这种控制作用可看成是“预调”。然后微分作用逐渐消失，而积分输出不断增加，这种控制作用可看成是“细调”，一直到余差消除，积分作用才有可能停止。而在 PID 的输出中，比例作用是自始至终与偏差相对应的，它一直存在，是一种最基本的控制作用。

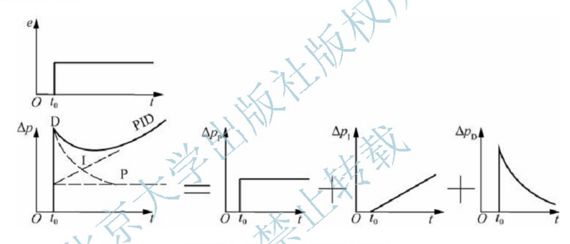


图 2.30 PID 控制的输出动态特性

概括地讲，积分控制会导致系统不稳定，微分控制会加强系统的稳定性。虽然，积分作用常用来减少或者消除比例控制中存在的余差以实现更精确的控制，它的副作用是导致系统振荡。尽管从理论上讲，在比例控制器中添加微分作用不能消除稳态偏差，但是它可以使比例控制器使用较狭窄的比例带，这样也可以将稳态偏差减小到可以接受的范围内。

2）比例积分微分控制规律的调整参数

PID 控制作用是比例、积分、微分三种控制作用的综合。它们在总的控制作用中的比重，需要与被控过程的特征和响应速度匹配。PID 控制器中的 3 个参数(比例度 δ、积分时间 T_{I}和微分时间 T_{D})是可以调整的。适当选取这 3 个参数的数值，可以获得良好的控制质量。对于一台实际的 PID 控制器，如果把微分时间调到零，就成为一台 PI 控制器；如果把积分时间放到最大，就成为一台 PD 控制器；如果把微分时间调到零，同时把积分时间放到最大，就成为一台纯 P 控制器了。各种控制作用过渡过程的比较如图 2.31所示。

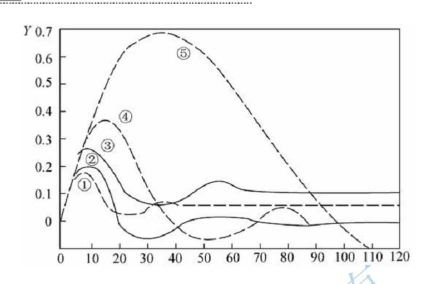


图 2.31　各种控制作用过渡过程的比较

①—比例微分作用；②—比例积分微分作用；

③—比例作用；④—比例积分作用；⑤—积分作用

PID 控制器综合了 P、I、D 这 3 种控制规律的优点，具有较好的控制性能。但这并不意味着任何条件下，采用这种控制器都是最合适的。一般来说，在对象滞后较大，负荷变化较快，不允许有余差的情况下，可以采用 PID 控制器；如果采用比较简单的控制器已能满足生产要求，那么就不必采用 PID 控制器。

2.3 传　感　器

2.3.1 传感器概述

1. 传感器的工作原理与组成

传感器是一种能把特定的被测量信息(诸如温度、压力、流量、液位、位置等非电信号)按一定规律转换成电信号输出的器件。传感器工作原理图如图 2.32 所示。为了对各种被测变量进行检测和控制，BAS 需要通过传感器把这些物理量转换成 DDC 控制器可接受的信号。传感器是 BAS 的重要设备之一。

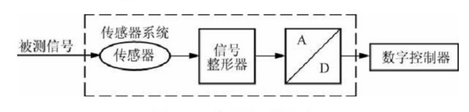


图 2.32　传感器工作原理图

传感器通常由敏感元件和转换元件组成。其中，敏感元件是指传感器中能直接感受或响应被测量的部分，转换元件是指传感器中将敏感元件感受或响应的被测量转换成适于传输或测量的电信号部分。当传感器的输出为规定的标准信号时，则称为变送器。在 BAS 工程中，变送器和传感器的功能通常结合在一起。

2. 传感器的分类

传感器按照输出信号的性质可分为开关量传感器和模拟量传感器。

1）开关量传感器

开关量传感器根据被测量是否高于或低于阈值，输出一个二进制数信号(开或关)。开关量传感器也可以是利用敏感元件的物理运动使切换开关处于开或关的机械式装置。典型的机械式装置包括温度继电器、压力开关、运动感应器等。开关量传感器的输出可直接与控制器的 DI 通道相连，用作状态报告或软件连锁。

开关量传感器一般采用非屏蔽软线(如 RVV2×1.0)与 DDC 控制器的 DI 通道连接。DDC 能判断 DI 通道上电平高/低两种状态，并将其转换成数字量“1”或“0”，进而对其进行逻辑分析和计算。

2）模拟量传感器

模拟量传感器将生产过程中的模拟量参数转换为连续的电信号，然后经信号处理电路将该电信号变成 0～10 V 或 4～20 mA 等标准信号。在建筑系统中，反映建筑环境状态的参数，如温度、湿度、流量、压力、液位、照度及电路参数等，都是连续的信号。这类参数随时间连续变化，属模拟量参数。测量这些参数的传感器就属模拟量传感器。模拟量传感器一般采用屏蔽软线(如 RVVP2×1.0)将测得的标准信号送到 DDC 控制器的 AI 端口。

模拟量传感器可分为被动式传感器和主动式传感器。被动式传感器只有敏感元件，没有变送器。所有的信号调节都发生在与之相连的控制器内。电阻式温度传感器就属于被动式传感器。这种传感器不需要提供能量，传感器与控制器的模拟输入直接通过现场布线相连。主动式传感器将信号调节集成在传感装置内。利用变送器将被测量转换成工业标准的电信号，并通过现场布线与控制器的模拟量输入通道(AI)相连。这类标准电信号的其中一种形式是 4～20mA 的信号。由于这种信号只需两相连接，因此被广泛应用在过程控制中。另一种典型的形式就是 0～10V 的直流信号。这种信号在暖通空调系统有广泛应用。其他形式的信号还有用于能量及流量测量的脉冲等。

举 例

在“图 2.12(a)DDC 对空调机组的监控示意图”中，采用的开关量传感器和模拟量传感器可完成如下功能：

(1) 压差开关实现报警。当过滤网两端压差过高时，压差开关输出报警信号，提示工作人员清洗或更换过滤网。风机两端也可装设压差开关，当压差过低时输出报警信号，表示风机有故障。压差开关是开关量传感器。

(2) 温度测量。回风温度反映的是室内温度情况。为了更好地调节控制室内的温度，往往还需要测量送风温度，以实现串级控制。温度传感器是模拟量传感器。

3. 传感器的发展趋势

当前，传感器、变送器总的发展趋势是朝着小型化、多功能化及智能化方向发展。特别是增加了数据处理功能、自诊断功能、软硬件相组合功能、人机对话功能、接口功能、显示和报警功能等。

最近出现的含有微处理器的智能传感器，是将被测量或被测量的状态转换成直接能在网络上与其他控制和测量用的智能装置进行通信的数字编码信号。另外，智能传感器在发送被测量之前还可能会进行一些额外的数据处理，如检查上下限、校正和补偿功能、计算其他推导值(比如焓)等。

2.3.2 传感器的性能指标

在控制系统的故障中，传感器引起的故障是最常见的。劣质传感器由于受漂移或早期故障的影响，往往会导致控制效果较差，维护费用较高。判别传感器的质量好坏，以及选择和使用检测仪表，都要用传感器的技术性能指标来衡量。

1. 测量范围和量程

测量范围是指被测量可按规定的准确度进行测量的范围。量程是指测量范围的上限值 x_{max} 和下限值 x_{min} 的代数差。选用仪表时，首先应对被测量的大小有初步估计，务必使被测量的值在仪表的量程以内。为保证实际测量的精确度及考虑到使用上的安全，一般传感器、仪表的经常工作点(测量示值)应在仪表量程的 2/3～3/4 处。对压力(压差)仪表应有较大的安全系数，其量程应大于该测量点可能出现的最大压力的 1.5 倍，其经常工作点在量程的 1/2～2/3 处。

2. 仪表的精度等级

传感器应具有高于工艺要求的测量精度。所谓精度(准确度)是指测量结果与被测量的真值之间的一致(或接近)程度。精度表示为仪表的最大绝对误差 Δx_{max} 与仪表量程($x_{max} - x_{min}$)的百分比，因此也称为最大引用相对误差。精度等级为仪表的最大引用相对误差去掉百分号后的数字经过圆整后的系列值，是衡量仪表质量的主要指标之一。例如，精度等级为 0.5 级的仪表，其允许误差为±0.5%，也就是说，该仪表各点示值的绝对误差均不得超过仪表量程(刻度范围)的±0.5%。

目前我国仪表采用的精度等级序列：0.005，0.01，0.02，0.04，0.05，0.1，0.2，0.5，1.0，1.5，2.5，4.0，5.0。一般工业用表为 0.5～4 级。序列数越大，仪表的精度等级越低、精度越低。仪表的精度等级，常以在反映仪表精度等级的数字外加一圆圈或三角号的形式标于仪表表头上，如：△1.5 ○0.5。

应该指出的是，对同一精度的仪表，如果量程不同，则在测量中产生的绝对误差是不同的。同一精度的窄量程仪表产生的绝对误差，小于同一精度的宽量程仪表的绝对误差。所以，在选用仪表时，在满足被测量的数值范围的前提下，尽可能选择窄量程的仪表，并尽量使测量值在满刻度的 2/3 左右。

在 BAS 控制系统中，传感器并不能保证达到生产厂家的铭牌精度。同时，在传感器的使用寿命周期内，其测量精度也是不断变化的，并不能始终保持其铭牌精度。整个测量系统的精度主要取决于以下几个因素：敏感元件的准确度，敏感元件的敏感性，敏感元件对其他相关变量的非敏感性，稳定性，延迟性，安装，信号调节和 A/D 转换。

3. 灵敏度和灵敏限(分辨率)

灵敏度表示测量仪表对被测量变化的反应能力。灵敏度的定义是当输入量变化很小

时，测量系统输出量的变化与输入量的变化的比值。测量系统的灵敏度高，意味着被测量稍有变化，测量系统就有较大的输出。一般来说，灵敏度越高，测量范围越小，稳定性也越差。

灵敏限是指引起仪表示值发生变化的可测参数的最小变化量，又称为仪表分辨率或仪表死区。通常，其值应不大于仪表允许误差的1/2。

4. 变差

在外界条件不变的情况下，使用同一仪表对同一被测量进行正、反行程(即逐渐由小到大和逐渐由大到小)测量时，所得仪表两示值之间差值的最大值与仪表量程之比，称为变差。造成变差的原因很多，如传动机构间正反向的间隙和摩擦力不相同造成的等。

5. 响应速度

为实现对控制系统的准确可靠控制，所选用的传感器必须能快速响应被测量的变化。传感器的响应速度通常用时间常数 T_s 表示。时间常数指当被测量从一个工况变化到另外一个工况时，传感器的响应输出所需的时间。在实际中，传感器的时间常数受其封装外壳、安装方式及被测媒介特性等的影响，还可能包括测量系统的其他额外延迟。比如，控制器的扫描速度会限制系统对被测量变化的响应速度，增加流经传感器流体的相对速度可以减小时间常数。

传感器的时间常数在控制系统中应有所考虑。如果时间常数选得太小，则被测量的短期波动会导致不希望的控制动作发生。在这种情况下，一般可通过控制软件来处理，典型的方法是采用平均函数来引入时间常数。如果时间常数太大，就意味着控制系统对被控量变化的响应速度很慢。在这种情况下，很难通过控制软件来补偿。

2.3.3 常用的模拟量传感器

1. 温度传感器

温度是建筑环境中一个非常重要的参数，对温度的自动控制除了能给人们提供一个舒适的环境外，还能节约大量的能源。在BAS工程中，温度传感器主要用于测量室内、室外、风管及水管的温度，以此来控制相应的水泵、风机、阀门和风门等执行元件的开度。

知识链接

温度

物质的温度由其分子平均运动速度大小决定。物质的分子始终在不断地运动。分子运动的速度越大，温度越高；分子运动速度越小，则温度越低。温度实质上反映了物质分子热运动的剧烈程度。在日常生活中，常以温度来反映物体的冷热程度。

衡量温度大小的单位有摄氏温度、开氏温度、华氏温度。我国工程技术上使用的是摄氏温度和开氏温度。某些进口设备的技术指标中则使用华氏温度。

在一个标准大气压下，以水的冰点为0℃、沸点为100℃，把其间分成100等份，每一等份为摄氏1度，记作1℃。按此分割制成的温度测量仪器称为摄氏温度计。在一个标准大气压下，以水的冰点为

273 K、沸点为 373 K，把其间分成 100 等份，每一等份为开氏 1 度，记作 1K。在一个标准大气压下，以水的冰点为 32 ℉、沸点为 212 ℉，把其间分成 180 等份，每一等份为华氏 1 度，记作 1 ℉。按此分割制成的温度测量仪器称为华氏温度计。当温度达到 0K 时，物质的分子停止了运动，把这个温度称为绝对零度。开氏温度也称绝对温度。

三种温度单位之间可以相互换算见表 2-3。

表 2-3　摄氏温度、开氏温度、华氏温度间的换算关系

换算关系	换算公式	符号说明
摄氏温度换算成华氏温度	$F=\frac{9}{5}t+32$	t——摄氏温度 F——华氏温度 T——绝对温度
华氏温度换算为摄氏温度	$t=\frac{5}{9}(F-32)$	
摄氏温度换算成开氏温度	$T=t+273$	


知识链接

温度传感器测温方式

温度传感器按照测温方式，可分为接触式和非接触式两大类。

所谓接触式温度传感器，即通过测温元件与被测介质的接触来测量物体的温度，具有测温简单、可靠、价廉，测量精度高的优点。但是，由于测温元件需要与被测介质进行充分的热交换，才能达到热平衡，因而会产生滞后现象；而且在测温过程中易破坏被测介质的温度场分布和热平衡状态，从而造成测量误差；同时，可能与被测介质产生化学反应。由于受耐高温材料的限制，接触式测量不能应用于很高温度的场合。在建筑系统中，温度传感器采用接触式方式测量温度。

非接触式温度传感器，即通过接收被测物体发出的辐射热来判断温度，具有测温范围广、速度快，可测量运动物体温度等优点。但是，它受到物体的发射率、被测介质到仪表间的距离、烟尘和水汽等其他介质的影响，一般测量误差较大。

1）常用的温度传感器

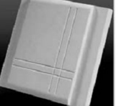
温度传感器的感温元件一般采用热电阻（铂热电阻、铜热电阻）、热敏电阻、热电偶等，测量精度优于±1%。温度检测器件的结构有墙挂式、水管式、室外温度式等，如图 2.33 所示。

（1）热电阻温度传感器。热电阻温度传感器以金属导体制成的热电阻作为感温元件。使用时将其置于被测介质中，由于热电阻的电阻值随温度而变化，具有近似线性的函数关系，因此可通过测量电阻进而反映出被测温度的数值。热电阻温度传感器具有较高的测量精度和灵敏度，便于信号的远距离传送及实现多点切换测量，在测温领域中的应用非常广泛。

热电阻有多种规格，目前应用最广泛的热电阻材料是铂和铜，并已做成标准化的热电阻，如 Pt100、Pt1000、Cu100、Cu50 等。铂热电阻测量精度高、稳定性好、可靠性高，长期以来得到了广泛的应用。但铂属于贵金属，价格高。铜热电阻的使用也较普遍。因为铜电阻的电阻与温度的关系几乎是线性的，电阻温度系数也比较大，而且材料容易提纯，价格便宜，所以在一些测量准确度要求不很高，且温度较低的场合多使用铜电阻。



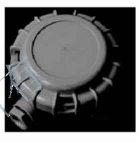

(a) 风管式温度传感器

(b) 室内温度传感器



(c) 水管式温度传感器

(d) 室外温度传感器

图 2.33 几种常用温度传感器的实物图

特别提示

Pt100、Pt1000、Cu100、Cu50 分别表示该种型号的热电阻在冰点(0℃)下的电阻值 R_0 分别为 100Ω、1000Ω、100Ω、50Ω。

有关这些标准化的热电阻的阻值与温度的对应关系，读者可以查阅相应的热电阻分度表。

(2) 热敏电阻温度传感器。热敏电阻温度传感器的感温元件是半导体材料。半导体热敏电阻体积小、热惯性小，适于快速测温，并且大多数具有负的温度系数(电阻值随着温度的升高而减小)。其最大的优点是温度系数大，灵敏度特别高，是金属电阻的 10 倍以上。但热敏电阻元件的稳定性、复现性和互换性较差，这给系统的维护带来一定的困难；并且电阻与温度呈较大的非线性关系，后续的 R-V(电阻-电压)变换和信号调理电路比较复杂，要进行非线性校正。

(3) 集成电路温度传感器。集成电路(IC)温度传感器分为模拟集成温度传感器和智能温度传感器两类。

模拟集成温度传感器将感温元件和变送器集成在一个芯片上，可实现温度测量和标准模拟信号输出的功能。其特点是测温误差小、价格低、响应速度快、传输距离远、体积小、功耗低，不需要进行温度校准，外围电路简单。

智能温度传感器也称为数字温度传感器，问世于 20 世纪 90 年代中期。智能温度传感器是微电子技术、计算机技术和自动测试技术的结晶，是集成温度传感器领域中最具活力和发展前途的一种新型智能温度传感器。其内部包含温度传感器、A/D 转换器、存储器(或寄存器)和接口电路，有的产品还带多路选择器、中央控制器(CPU)、随机存取存储器(RAM)和只读存储器(ROM)。

智能温度传感器采用数字化技术，能以数字量形式输出被测温度值，具有误差小、分辨率高、抗干扰能力强、能远程传输数据、用户可设定温度上下限、能实现越限自动报警功能、自带串行总线接口、适配各种微控制器等优点，是今后传感器发展的主要方向。


举 例

西门子温度传感器见表 2-4。

表 2-4 西门子温度传感器

安装位置	1000 欧姆铂电阻 －40～116℃	100 欧姆铂电阻 (带变送器)	10K 欧姆热敏电阻 13～35℃	100K 欧姆热敏电阻
室内	TEC-1000 系列	536200(4～32℃)	TEC-2000 系列	536195(7～49℃)
室外	544578	536768(－50～50℃)	—	536778(－18～49℃)
风管	544339	533376(－7～49℃) 533377(21～104℃)	—	535741(4～66℃)
水管	544577	536767(－1～121℃) 536774(－7～21℃)	—	536777(－1～116℃)

2）温度传感器的选型

温度传感器的选型流程如图 2.34 所示。测量对象(如水、空气或油)对传感器的外层材料、防护等级等要求不同。安装位置(如室内、室外或管道)对传感器的外形要求不同。传感器及变送器必须以提供 DDC 可接收的信号为原则。DDC 可接收的类型包括：电压(0～10V DC)、电流(0～20mA 或 4～20mA)、1kΩ 铂电阻、10kΩ 热敏电阻、100kΩ 热敏电阻等。实际工作中须视具体 DDC 控制器而定。温度传感器的量程应为测点范围的 1.2～1.5 倍，测量精度应高于工艺要求。测量范围和测量精度决定于传感器的材料和变送器的输出。

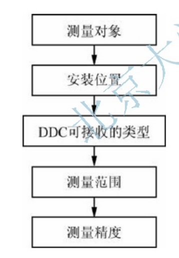


图 2.34 温度传感器的选型流程

3）温度传感器的接线

在使用金属热电阻测温时，要特别注意热电阻引线对测量结果会有较大影响。常用的引线方式有二线制、三线制和四线制 3 种，如图 2.35 所示。

二线制接线方便，安装费用低，但是引线电阻及引线电阻的变化会带来附加误差，适用于引线不长，测温准确度低的场合。三线制接线只要两引线电阻相等，便可以较好地消除引线电阻的影响，且引线电阻因沿线环境温度变化而引起的阻值变化量也被分别接入两个相邻的桥臂上，可相互抵消，其测量准确度高于两线制，应用较广。尤其是在测温范围窄、导线长、架设铜导线途中温度发生变化等情况下，必须采用三线制接法。四线制接线不管引线电阻是否相等，通过两次测量均能完全消除引线电阻对测量的影响，且在连接导线阻值相同时，还可消除连接导线的影响，这种方式主要用于高准确度温度的检测。

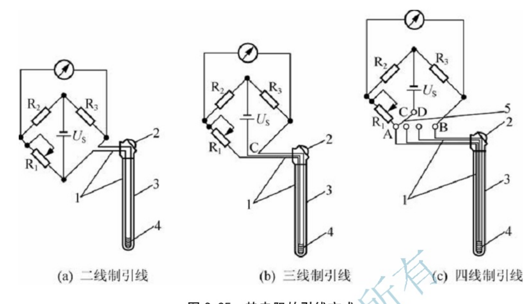


图 2.35 热电阻的引线方式

1—引出线；2—接线盒；3—保护套管；4—热电阻感温元件；5—转换开关

特别提示

以铂热电阻为例，由于 Pt1000 比 Pt100 阻值大，引线电阻所带来的附加误差相对小。因此，在 BAS 工程中，采用 Pt1000 作为温度传感器时，可以采用二线制连接，而 Pt100 应采用三线制或四线制连接。

半导体热敏电阻由于在常温下的电阻值很大，通常在几千欧以上。这样，引线电阻(一般最多不超过 10 Ω)几乎对测温没有影响，所以根本不必采用三线制和四线制，给使用带来了方便，较适宜远距离测温。

4）温度传感器的安装

空间温度是一个场的概念。温度在空调房间各处的分布往往是不一致的，即使在同一高度仍存在相当大的温度梯度。测试表明，一个 300m^2的办公室中 1.5 m 高度的温度大约相差 4℃。对于体育场馆、艺术馆、机场候机楼和会展中心等空间建筑，温度梯度的问题会非常严重，设计和安装不当会造成监测参数根本就不是需要监控处的温度，这种情况需要引起高度的重视。

对温度传感器的安装主要要求：壁挂式温度传感器应安装在空气流通、反映被测房间空气状态的位置；风道内温度传感器应保证插入深度；插入式水管温度传感器应使测头在水流的主流区域范围；机器露点温度传感器应安装在挡水板后具有代表性的位置，应避免辐射热、振动、水滴及二次回风的影响。

2. 湿度传感器

1）概述

人体所感觉的冷热程度，不仅与空气温度有关，而且还与空气中水蒸气的多少有关，即与湿度有关。空气湿度过高或过低，都会使人体感到不舒适，甚至影响身体健康。湿度

是表示空气干湿程度的物理量，和温度一样，也是建筑环境空气状态及质量的重要参数。

BAS通过湿度传感器来测量室内、室外和管道的相对湿度。湿度传感器的输出信号一般都经变送器变为标准的电压(0～5V，0～10V DC)信号或电流(4～20mA)信号。

知识链接

相对湿度

工程中，湿度通常是指空气的相对湿度。相对湿度是空气中水蒸气的实际分压力 p_c 与相同空气温度下的饱和水蒸气压力 p_{cB} 之比，用 ϕ 表示。即 $\phi=(p_c/p_{cB})\times100\%$。在一些工程资料中，也常用R. H. 来表示相对湿度。

空气的相对湿度是衡量湿空气继续吸收水分能力的参数：ϕ 越小，表示空气继续吸收水分的能力越大；反之，ϕ 越大，空气中的水分已接近饱和状态，再吸收外部水分的能力就小。

相对湿度是衡量空气环境的潮湿程度对人体和生产是否合适的一项重要指标。空气的相对湿度越大，则表明空气越潮湿，此时人体不能充分发挥出汗的散热作用，便会感到闷热；相对湿度越小，则表明空气越干燥，水分便会蒸发得越快，此时人体会觉得口干舌燥。在生产过程中，为了保证产品质量，也应对相对湿度提出一定的要求。若 $\phi=100\%$，对应的空气状态为饱和空气；若 $\phi=0$，对应的空气状态为干空气。

2) 常用的湿度传感器

常用的湿度传感器有薄膜电容式、高分子电阻式和集成电路式。

薄膜电容式湿度传感器在BAS中应用最普遍。其基本结构是一层非常薄的感湿聚合物电介质薄膜夹在两电极之间作为电介质，构成一平板电容器。这种电极必须薄到能允许水蒸气通过。由于聚合物薄膜具有吸湿与放湿性能，而水的介电常数又很高，故当水分子被聚合物吸收后，将使薄膜电容量产生很大变化。聚合物吸湿与放湿程度随着被测空气的相对湿度的变化而变化，因而其电容量是空气相对湿度的函数。因此，通过测量薄膜电容值就可以测量出相应的空气相对湿度。

薄膜电容式湿度传感器测量范围大，测量精度较高(可达±1%)，互换性较好，长期使用飘移误差可小于±1%/年。但其易受油垢污染的影响，当测量湿度偏离标定湿度时，其测量精度也会受到影响。

集成电路式湿度传感器是将湿度敏感元件(如薄膜电容式敏感元件)与信号转换电路集成在一起而形成的固态相对湿度传感器。



西门子湿度传感器产品见表2-5。

表2-5 西门子湿度传感器产品

型 号	QFA65	QFM65	QFA66+AQF21.1	QFM66
安装位置	室内	风管	室外	风管
电源	AC 24V	AC 24V	AC 24V	AC 24V

续表

型　　号	QFA65	QFM65	QFA66＋AQF21．1	QFM66
输出	DC 0～10V	DC 0～10V	DC 0～10V	DC 0～10V
精度	±5％ rH	±5％ rH	±2％ rH	±2％ rH
与温度传感器组合	是	是	是	是

注：将温、湿度传感器与焓值变送器(AQF61.1)组合，可以提供空气的绝对湿度和焓值。

3） 湿度传感器的安装

湿度传感器应安装在附近没有热源和水滴，空气流通，能反映被测房间或风道内空气状态的位置。在工程应用中，湿度传感器和温度传感器往往集成在一起，即温、湿度传感器。如图 2.36 所示温、湿度传感器与现场控制器的接线图。

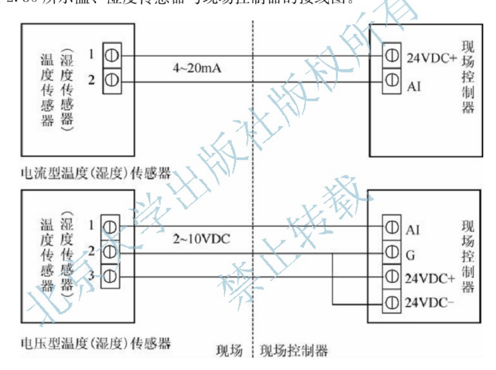


图 2.36　温、湿度传感器与现场控制器的接线图

3. 压力或压差传感器

1） 概述

压力(压差)传感器是用于监测流体的压力(压差)的装置。在建筑系统中，水压力(压差)传感器主要用于冷热源系统中，用于压差旁通控制和监测水泵的运行状态，也有将水压力传感器安装在水箱内用于测量水箱的液位。空气压力(压差)传感器则主要用于监测管道压力和监测风机运行状态。

压力(压差)传感器的工作原理如图 2.37 所示。感压元件在被测压力(压差)的作用下产生形变位移输出，经位移检测器将位移信号变换为电量信号，再通过放大、调零滤波等信号处理电路，输出 0～10V DC 或 4～20mA DC 等形式的标准信号。

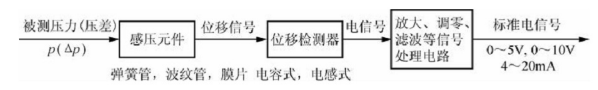


图 2.37 压力(压差)传感器的工作原理

感压元件采用弹性元件，如弹簧管、波纹管、膜片或波纹管与弹簧组合等，常用弹性元件结构如图 2.38 所示。弹性元件在压力 p 与外侧的大气压的相互作用下产生位移信号 x。

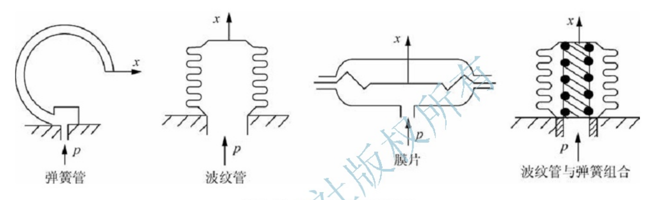


图 2.38 常用弹性元件结构

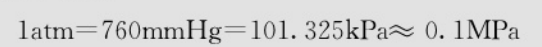
知识链接

压力相关的概念

压力是垂直作用在单位面积上的力，即物理学上的压强(工程上把物理学中的压强习惯地称为压力)。任意两个压力的差值称为压差。在 BAS 中，压力、压差是反映工质状态的重要参数。

压力的单位为 N/m^2，称为帕斯卡(Pa)。工程中常以兆帕(MPa，即 10^6 Pa)、巴(bar，即 10^5 Pa)为单位。此外，常用的压力单位还有毫米汞柱(mmHg)和毫米水柱(mmH_2O)、标准大气压等。

大气压的大小与海拔高度和温度有关，所以规定了标准大气压。所谓标准大气压是指在纬度为 45°、温度为 0℃时海平面的大气压力，记为 atm。



$$1atm = 760mmHg = 101.325kPa \approx 0.1MPa$$



图 2.39 压力表

气体的压力若以绝对真空作为测量的基准，所得到的压力值为绝对压力(p_a)。如果以当地大气压(记为 B，约 0.1MPa)作为测量的基准点，所测得的压力为相对压力(p_q)。工程中使用压力表如图 2.39 所示内部的感压元件是弹簧管，测量的即为相对压力。所以相对压力常俗称为表压。一般，在设计、计算时使用绝对压力，而在工程的调试、安装时采用相对压力。

绝对压力与相对压力的关系为：

$$p_a = p_q + B$$

当 $p_a > B$ 时，p_q 为正值，称为正压；当 $p_a < B$ 时，p_q 为负值，把 p_q 的绝对值称为真空度(p_v)。凡是气体低于当地大气压的状态统称为真空。

在流体中不受流速影响而测得的表压力是静压。对于管道流动由管壁处所测得的压力，均为静压值。把用液柱高度表示的静压称为压头，用 mH_2O 表示。静压也称为静水头。而动压是指流体单位体积所具有的动能大小。动压又称动压头。通常用 $1/2\rho v^2$ 计算(ρ—流体密度；v—流体运动速度)。

特别提示

在工程现场，工程技术人员常会说某管道(容器)的压力是多少kg？此处的“kg”不是指质量，而是 kgf/cm^2(一种压力的单位)。$1kgf/cm^2$ 表示1kg的重物作用到 $1cm^2$ 上产生的压力，称为一个工业大气压，也称工程大气压，记为at。

$$1at = 1kgf/cm^2 = 9.8\times10^4 Pa \approx 0.1MPa。$$

比如水管上压力表读数是3kg压力，就是指 $3kgf/cm^2$，约等于0.3MPa。

2) 常用的压力(压差)传感器

根据位移检测的方法，压力(压差)传感器有电容式、应变片式和压阻式等形式。

(1) 电容式压力传感器。电容式压力传感器的结构如图2.40所示。图中所示的感压元件(一个很薄的弹性膜片)作为动电极，两个在凹形玻璃上的金属镀层作为固定电极，共同构成差动电容器。当被测压力或压力差作用于膜片并产生位移时，所形成的两个电容器的电容量，一个增大，一个减小。该电容值的变化经测量电路转换成为与压力或压差相对应的电流或电压的变化。

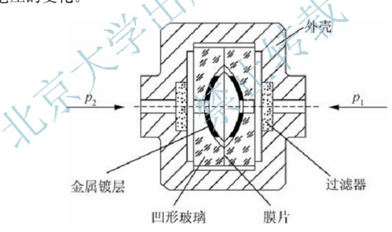


图2.40 电容式压力传感器的结构

(2) 应变片式电阻压力传感器。应变片式电阻压力传感器通常为丝状结构，电阻改变与压力传感元件内的应力成正比。利用惠斯通电桥可直接进行测量，也可以经转换电路转换成电压或电流信号。

(3) 压阻式压力传感器。压阻式压力传感器是一种较新型的压力传感器，也称为固态应变式压力传感器。它采用集成电路工艺在单晶硅膜片上扩散一组等值应变电阻，而膜片置于接收压力的腔体内，当压力发生变化时，硅膜片产生应变，使直接扩散的应变电阻产生与压力成比例的变化。这种压力传感器灵敏度高，测量精度可达±0.1%，输出信号通常有电压信号和频率信号。



举 例

(1) 西门子 QBE9000 系列压力传感器见表 2-6。采用压力电阻测量原理，陶瓷膜片(厚膜混合工艺)通过与介质直接接触测量压力。相关技术指标如下：工作电压为 AC 24V，50～60Hz 或 DC16～33V；最大电流< 4mA；输出信号为 DC0～10V；响应时间<2ms；防护等级为 IP67。

表 2-6　西门子 QBE9000 系列压力传感器

型　　号	测压范围		输　　出	实　物　图
QBE9000-P10	0～10bar	0～1.0MPa	DC 0～10V	
QBE9000-P16	0～16bar	0～1.6MPa	DC 0～10V	
QBE9000-P25	0～25bar	0～2.5MPa	DC 0～10V	

(2) 西门子 QBE、QBM 系列压力(压差)传感器见表 2-7。

表 2-7　西门子 QBE、QBM 系列压力(压差)传感器

型　　号	测　量　值	介　　质	电　　源	输　　出	测量范围
QBE61.1	压力	水	AC 24V	DC 0～10V	0～40bar
QBE61.3	压差	水	AC 24V	DC 0～10V	0～10bar
QBM65	压差	空气	AC 24	DC 0～10V	−50～2500Pa
QBM66	压差	空气	AC 24	DC 0～10V	0～1500/3000Pa

3) 压力(压差)传感器的安装

在同一建筑层的同一水系统的压力(压差)传感器，应处于同一标高。对于液体，压力传感器的测量位置应在侧面，接近管底部，而不得在管顶部(此处可能因气密性而受影响)或底部(此处可能因污物而受影响)测量压力。对于冷凝气体压力的测量，测量位置应在管道顶部，则不会有冷凝水接触到传感器。当所测的管道容器的环境条件不适宜直接安装压力传感器时，传感器应远程安装，如图 2.41 所示。即通过固定支架和安装配件将压力引出，并注意不让冷凝水接触到传感器。

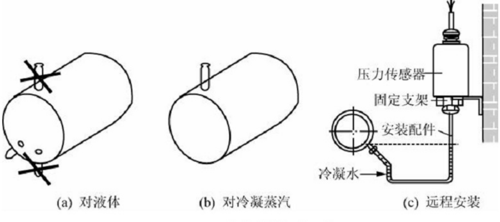


图 2.41　压力传感器安装示意图

4. 流量传感器

流量传感器主要用来检测水系统中液体的流量，以此来控制相应水泵阀的数量。检测流量有多种方法，有节流式、容积式、速度式、电磁式等。在使用流量检测仪表时要考虑控制系统容许压力损失，最大、最小额定流量，使用场所的环境特点及被测流体的性质和状态，也要考虑仪表的精度要求及显示方式等。

知识链接

流体在管道中流动时的几个基本概念

(1) 过流断面。流体运动时，与流体的运动方向垂直的流体横断面的面积(A)，单位为 m^2。

(2) 流量。有体积流量和质量流量之分。在单位时间内通过过流断面的流体的体积称为体积流量(Q_v)，单位为 m^3/s。在单位时间内通过过流断面的流体的质量称为质量流量(Q_m)，单位为 kg/s。体积流量与质量流量的关系为：

$$Q_m=\rho \cdot Q_v$$

(3) 流速。在单位时间内流体移动所通过的距离称为流速(v)，单位为 m/s。由于流体黏性的影响，过流断面上各点的流速不是均匀分布的。在实际工程中经常采用过流断面上各点流速的平均值，即平均流速。平均流速通过过流断面的流量应等于实际流速通过该断面的流量，这是确定平均流速的假定条件。

流量、过流断面和流速三者之间的关系为：

$$Q_m=\rho \cdot v \cdot A,\ Q_v=v \cdot A$$

根据测量介质的不同，流量传感器可分为气体流量传感器和液体流量传感器两类。通常，气体流量传感器用于监测和控制风机、风阀及变风量(VAV)装置末端的流量；液体流量传感器用于监测和控制水泵、锅炉、冷水机组、热交换器的流量。与温度测量配合，流量测量也可用于能(热)量的测量。常用的流量传感器有涡街流量计、电磁流量计和超声波流量计等。流量传感器实物照片如图 2.42 所示。



(a) 涡街流量计



(b) 电磁流量计



(c) 超声波流量计

图 2.42　流量传感器实物照片

1) 涡街流量计

涡街流量计是依据流体自然振荡原理工作的流量计，具有准确度高、量程比大、流体的压力损失小、对流体性质不敏感等优点，目前应用较为广泛。

根据“冯·卡门涡街”原理，在管道中垂直于流体流向放置一个非线性柱体(漩涡发生体)，当流体流量增大到一定程度以后，流体在漩涡发生体两侧交替产生两列规则排列的漩涡。两列漩涡的旋转方向相反，且从发生体上分离出来，平行但不对称，这两列漩涡被称为卡门涡街，简称涡街。当漩涡稳定时，漩涡产生的频率与流量有关。因此，涡街流量计可以通过测量漩涡产生的频率来测量流量。涡街流量计测量范围大(量程比 10∶1 或 25∶1)，测量精度较高(±0.5%～±1%)，并且涡街流量计的结构简单，无运动部件，适用于 15～400mm 的管道，可广泛用于气体、液体和蒸汽流量的测量。其主要缺点是抗振动能力差。

2) 电磁流量计

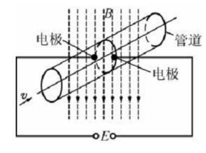


图 2.43 电磁流量计测量原理

电磁流量计是基于法拉第电磁感应定律工作的流量仪表。仪表不直接接触流体介质，被测流体应具有一定的电导率，测出的是体积流量。

根据法拉第电磁感应定律，导体在磁场中运动时，导体上必然会产生感应电动势。同理，导电的流体在磁场中垂直于磁力线方向流过，切割磁力线会产生感应电动势。用右手定则确定流体运动、磁场和感应电动势的方向关系。如图 2.43 所示在管道两侧的电极上取出感应电动势 E。感应电动势的大小与流体的速度关系为：

$$E=BDv$$

式中 E——感应电动势，V；

B——磁场感应强度，T；

v——垂直于磁力线方向介质的平均流速，m/s；

D——管道内径，m。

因此，通过电磁流量计的体积流量为：

$$Q_v=v\cdot A=\frac{\pi D^2}{4}\cdot\frac{E}{BD}=\frac{\pi D}{4B}E=\frac{1}{K}E$$

其中，对于固定的电磁流量计，K 是定值。

被测介质在测量导管中流通，管道选用非导磁、低电导率、低热导率的材料制成，如不锈钢、玻璃钢等；管内壁必须绝缘，保证感应电动势不被金属管短路；电极必须耐磨、耐蚀，在结构上防漏、不导磁，大多数时候采用不锈钢。

电磁流量计在实际工程中得到了广泛的应用。仪表测量流速的量程比高达 100∶1，有的甚至达 1000∶1；流量计的口径从 ϕ2～2400mm；仪表的精度为 0.5～1.0 级。由于被测介质的电导率不能太低，因此不能测气体和蒸汽。使用中要求注意远离环境磁场的干扰，而且要保证直管段足够的长度。

3) 超声波流量计

超声波的测量原理是产生一个超声信号，通常在两个方向穿过热流介质，如图 2.44 所示。通过修正信号行程的时间可测定流体的平均速度和流量。该信号对角地或横向地穿过热流介质。在管线中流体的速度分布的差别取决于流动形式。超声波发射器和接收器通常是压电半导体器件。

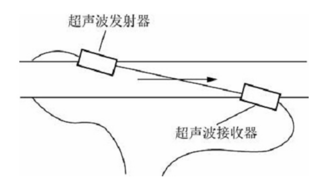


图 2.44 超声波流量计测量原理示意图

超声波流量计从管道外部进行测量是一种非接触式的测量方法。其在管道内部无任何插入测量部件，故没有压力损失，不改变原流体的流动状态，对原有管道不需任何加工就可以进行测量，使用方便。超声波流量计的测量结果不受被测流体的黏度、电导率的影响，故可测各种液体或气体的流量，尤其适于测量大口径管道的水流量或各种水渠、河流、海水的流速和流量。超声波流量计的输出信号与被测流体的流量成线性关系。

但超声波流量计的准确度不太高，约为 1%。由于温度对声速影响较大，故一般不适于温度波动大、介质物理性质变化大的流量测量。另外，超声波流量计在小流量、小管径的流量测量时，相对误差会增大，因此也不适合于这种情况下应用。

超声波流量计对信号的发生、传播及检测有各种不同的设置方法，其中最为典型的是速度差法超声波流量计和多普勒超声波流量计。

(1) 速度差法超声波流量计是根据超声波在流动的流体中，顺流传播的时间与逆流传播的时间之差与被测流体的流速有关这一特性制成的，是目前极具竞争力的流量测量手段之一，其测量准确度已优于 1.0 级。使用时要注意安装地点有一定长度的直管段，所需直管段长度与管道上阻力件的形式有关。一般，当管道内径为 D 时，上游直管段长度应大于 $10D$，下游直管段长度应大于 $5D$。当上游有泵、阀门等阻力件时，直管段长度至少应有 $(30\sim50)D$，有时甚至要求更高。

(2) 多普勒超声波流量计是基于多普勒效应测量流量的。其测量流量的必要条件：被测流体中存在一定数量的具有反射声波能力的悬浮颗粒或气泡。多普勒超声波流量计能用于两相流的测量，这是其他流量计难以解决的难题。多普勒超声波流量计具有分辨率高，对流速变化响应快，对流体的压力、黏度、温度、密度和导电率等因素不敏感，没有零点漂移，重复性好，价格便宜等优点。因为多普勒超声波流量计是利用频率来测量流速的，故不易受信号接收波振幅变化的影响。

5. 空气质量传感器

空气质量的优劣与舒适性密切相关。空气质量传感器主要是用于检测空气中 CO_2、CO 或者 VOC(可挥发有机物)的含量，以控制室内的空气质量。

空气质量传感器由一个镀有薄层的半导体管、一对电极及在半导体管内的微型加热器元件组成。在保持温度不变化的情况下，半导体吸收气体，导致电子释放，由此改变两个电极之间的电阻从而产生输出信号。空气质量传感器的工作电源为 24V AC/DC，输出信号为 0～10V DC。

半导体气体传感器的优点是制作和使用方便，价格便宜，响应快，灵敏度高，被广泛地用在建筑设备自动化系统的气体监测中。如图 2.45 所示空气质量传感器实物图。



(a) 室内型　　(b) 风道型

图 2.45　空气质量传感器实物图

知识链接

空气质量传感器工作原理

最常用的空气质量传感器为半导体的气体传感器。传感器平时加热到稳定状态，空气接触到传感器的表面时，一部分分子被蒸发，另一部分分子经热分解而固定在吸附处。有些气体在吸附处取得电子变成负离子吸附，这种具有负离子吸附倾向的气体称为氧化型气体，或电子接收型气体，如 O_2；另一些气体在吸附处释放电子而成为正离子吸附，具有这种正离子吸附倾向的气体，称为还原型气体，或电子供给型气体，如 H_2、CO、碳氢化合物和醇类等，当这些氧化性气体吸附在 N 型半导体上，还原性气体吸附在 P 型半导体上时，将使半导体的载流子减少。反之，当还原性气体吸附到 N 型半导体上，而氧化性气体吸附到 P 型半导体上时，使载流子增加。正常情况下，器件对氧吸附量为一定，即半导体的载流子浓度是一定的，如异常气体流到传感器上，器件表面发生吸附变化，器件的载流子浓度也随着发生变化，这样就可测出异常气体浓度大小。

6. 液位传感器

液位传感器可用于控制液位高度，主要的测量原理有静压式、超声波式、电容式等。在建筑系统中，常需要判断液位的位置，而很少有需要测量液位的高度。因此，本书不对液位传感器做深入介绍。判断液位位置的经济实用的方法是使用液位开关(参见 2.3.4 中“开关量传感器”)。

7. 电量变送器

变配电所各种电气参数要进入计算机监控系统，必须先通过电量变送器，将各种交流电气参数变为统一的直流参数。常用的电量变送器有电压变送器、电流变送器、频率变送器、有功功率变送器、无功功率变送器、功率因数变送器和有功电度变送器等。

电压变送器通常将单相或三相的交流电压 110V，220V，380V 变换为直流 0～5V，0～10V 电压或者 0～20mA，4～20mA 电流输出。电流变送器通常将 0～5A 的交流电流变换为直流 0～5V，0～10V 电压或者 0～20mA，4～20mA 电流输出。频率变送器、有功功率变送器、无功功率变送器、功率因数变送器和有功电度变送器等同样是将相应的电参数变换为与上述相同的电信号输出。如图 2.46 所示电量变送器实物图。



图 2.46 电量变送器实物图

8. 热量计量仪表

热量计量仪表如图 2.47 所示。热量计量仪表同时测量管线系统的体积流量、相应的供水和回水温度。计算器根据热量计算公式 $Q=\rho \cdot Q_V \cdot c \cdot (t_{回水}-t_{供水})$，计算管线系统的热消耗。

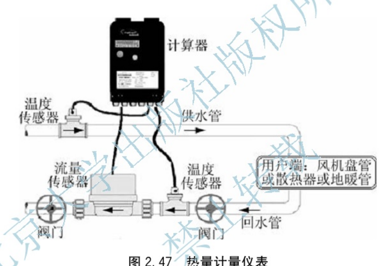


图 2.47 热量计量仪表

2.3.4 常用的开关量传感器

我们把检测得到的信号是数字量的传感器，称作为开关量传感器。该信号将通过 DI 通道输入到 DDC 中。

特别提示

一般来说，模拟量传感器价格比较昂贵，其成本占控制系统构成成本的很大一部分。如果工艺过程并不要求准确的物理参数数值，而只关心被控量是否超过一定限值作为保护和报警的依据，则应采用仅输出“通”或“断”信号的开关量传感器。相比较价格昂贵的模拟量传感器，开关量传感器的成本则大为降低。

1. 压差开关

压差开关是根据空气或液体的两端压差是否在规定的范围内，输出开关动作的装置。

水压压差开关常用于监测水泵的运行状态。空气压差开关常用于检测风机的运行状态和空调过滤器是否堵塞，如图 2.48 所示。空气压差开关的实物图与安装接线图如图 2.49 所示。

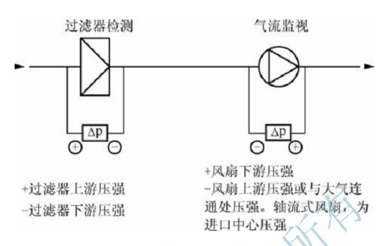


图 2.48 空气压差开关应用示意图

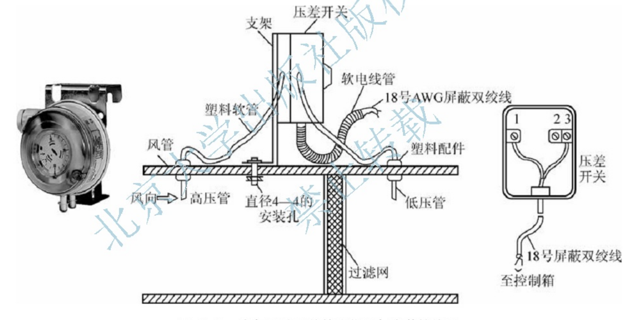


图 2.49 空气压差开关的实物图与安装接线图



举 例

西门子 QBM81 系列空气压差开关见表 2-8。

表 2-8 西门子 QBM81 系列空气压差开关

型 号	测量值	介 质	电 源	输 出	测量范围
QBM81-3 QBM81-5 QBM81-10	压差开关	空气	—	干触点	0～300Pa 0～500Pa 0～1000Pa

特别提示

(1) 压差开关与压差传感器是不同的。压差开关输出的是感触点(通/断)信号，接到DDC控制器的DI通道。而压差传感器输出的是模拟量(连续)信号，接到DDC控制器的AI通道。

(2) 选用压差开关时应注意量程范围。比如检测空气过滤器阻力所需的动作压力一般要求仅在100～200 Pa，这就要求选择微压差开关。

2. 水流开关(流速开关)

水的流动使传感部件产生位移，克服弹簧弹力推动微动开关闭合。当流速低到不足以克服弹簧弹力时，微动开关断开。风速开关也是类似的原理。流速开关主要用于检测管道内流体的流动状态。比如，水流开关用于检测水泵启动后管路中的水是否开始流动。又如，在冷水机组的冷冻水侧和冷却水侧安装水流开关可以检测水流状态，若水流正常则冷水机组可以启动，若水流异常(水流很小或停止)则冷水机组应停机。



图2.50　常用水流开关传感器的实物图

如图2.50所示常用水流开关传感器的实物图。如图2.51所示常用水流开关安装接线。

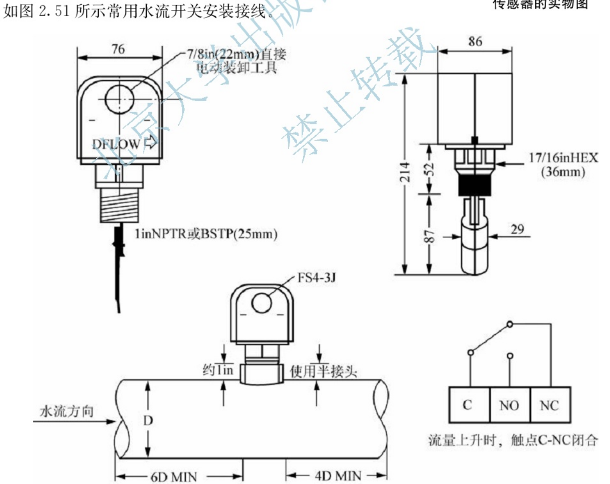


图2.51　常用水流开关安装接线

3. 液位开关

液位开关，又称为液位信号器，是随液位变动而改变通断状态的有触点开关。按照结构区分，液位开关有磁性开关(也称为干式舌簧管)、水银开关和电极式开关等几大类。在建筑设备自动化系统中，液位开关主要用于液面高度的控制，如对储水箱的报警液位的监测。

电缆浮球液位开关如图 2.52 所示。电缆浮球液位开关是利用微动开关或水银开关做接点零件，当电缆浮球以重锤为原点上扬一定角度时(通常微动开关上扬角度为 28°±2°，水银开关上扬角度为 10°±2°)，开关便会有“ON”或“OFF”信号输出。

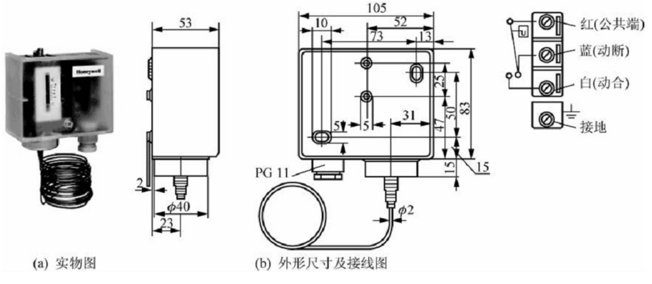


图 2.52 电缆浮球液位开关

4. 防冻开关

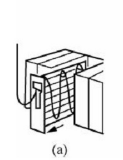
防冻开关应用于空调机组或新风机组在冬季运行时的防冻保护，在机组送风温度过低时报警，同时联动保护动作，以防止机组中的盘管冻裂。在低于设定温度时，防冻开关给出信号，停止或加热防止设备管道冻裂。如在新风机组或在空调机组中，防冻开关设在表冷器之后，在检测到温度低于设定值时，则防冻开关动作。

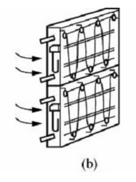
如图 2.53(a)所示霍尼韦尔防冻开关实物图，防冻开关外形尺寸及接线见图 2.53(b)。防冻开关安装如图 2.54 所示。



(a) 实物图 (b) 外形尺寸及接线图

图 2.53 霍尼韦尔防冻开关





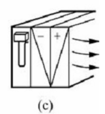


图 2.54　防冻开关安装

2.4　执　行　器

2.4.1　概述

1. 执行器的作用

DDC控制器经逻辑运算后产生的控制信号，通过输出通道(AO或DO)送入执行器，由执行器执行控制动作，直接控制能量或物料等被测介质的输送量。执行器类似于人的“手脚”，是自动控制的终端主控器件。

执行器安装在生产现场，常年和生产工艺中的介质直接接触，执行器的选择不当或维护不善常使整个控制系统不能可靠工作，严重影响控制品质。

2. 执行器的组成与分类

执行器由执行机构和调节机构两部分组成。执行机构是执行器的推动部分，它接受来自控制器的控制信号，根据控制信号的大小产生位移信号。根据采用的动力能源形式，执行机构可分为气动、电动、液动三种。在BAS中常用的是电动执行机构。

调节机构是执行器的调节部分。最常见的调节机构是调节阀，它接受执行机构输出的位移信号的操纵，改变阀芯与阀座的流通面积，控制工艺介质的流量或能量。

3. 执行器与控制器之间的连接

根据控制系统输出信号的不同，执行器与控制系统间的连接通道有模拟量输出通道(AO)和数字量输出通道(DO)两种形式。DDC控制器输出给电动执行器的信号有连续信号和断续信号两种。

在BAS中，若需要执行器实现连续调节的方式，则控制器输出的应是连续(模拟)信号，如4～20mA电流信号或0～10V电压信号。控制器通过AO通道将控制命令送入执行器。接受该信号的应是连续调节型的执行器，其与DDC之间采用屏蔽软线(如RV-VP 2×1.0)连接。

断续信号是指开关信号，DDC通过非屏蔽软线(如RVV 2×1.0)经DO通道将控制信号输送到执行器。

2.4.2 电动调节阀

电动调节阀安装在工艺管道上，用以调节流体的流量，是一种投资省，且简单实用的方法。电动调节阀直接与被调介质相接触，因此它的性能好坏将直接影响控制的质量。只有正确选择阀门的结构形式和流量特性，才能够取得良好的控制效果。

电动调节阀由电动执行机构(也称为阀门驱动器)和阀门(也称为阀体)两部分组成，如图2.55和图2.56所示。电动执行机构依据现场DDC输出的AO信号(0～10V DC电压或4～20mA电流)控制阀门的开度。电动调节阀中的调节机构是阀门，用来控制水、空气、蒸汽等流体。



图2.55 阀门驱动器



(a) VVG系列
两通螺纹阀



(b) VXG系列
三通螺纹阀



(c) VVF系列
两通法兰阀

（公称内径有DN15，DN20，DN25，DN32，DN40，
DN50，DN65，DN80，DN100，DN125，DN150）

图2.56 阀体

特别提示

(1) 管道内流体流量的连续控制除了采用调节阀的方法外，还可采用电机变频调速直接控制水泵的转速来实现调节流量。但这种方法的投资较大。

(2) 在结构上，阀体和阀驱可以组装成整体式的电动调节阀，也常常单独分装以适应各方面的需要。

初学者在BAS设计中配置执行器时，常会漏了执行机构和调节机构两者之一。比如，配置空调机组用的电动调节阀时，往往只配置了阀体(调节机构)，而遗漏了阀门驱动器(执行机构)。应注意在选用分体式执行器时，阀体和阀门驱动器都需要选。如图2.57所示阀体和阀驱组装后的实物图。



图2.57 阀体与阀驱组装后的实物图

1. 电动执行机构

1) 工作原理

电动调节阀的执行机构以电动机为动力，电动机多为交流电容式两相异步电动机，其电源电压为24V AC。风机盘管上使用的电动调节阀则用磁滞电动机，电源220V AC。阀门驱动器按输出方式可分直行程、角行程和多转式三种类型，分别同直线移动的调节阀、旋转的蝶阀、多转式调节阀配合工作。

如图2.58所示直线移动的电动调节阀原理。阀杆的上端与执行机构相连接，当阀杆带动阀芯在阀体内上下移动时，阀芯与阀座之间的流通面积、阀的阻力系数随之变化，其流过阀的流量也就相应地改变，从而达到了调节流量的目的。

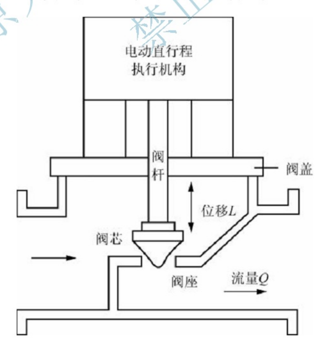


图2.58 直线移动的电动调节阀原理

调节阀的阀位与控制器输出的 AO 信号(0～10V DC)成线性关系，如图 2.59 所示。

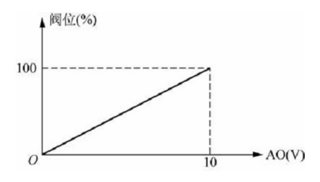


图 2.59 阀位与控制器 AO 的关系

知识链接

电动执行机构的深入知识

电动调节阀的电动执行机构由电动机、机械减速器、复位弹簧(当无手动复位机构时才有)及附件(电子转换器、反馈电位器、阀位指示电位器等)组成。电子转换器又称电动阀门定位器，安装在执行机构内，它接受控制器 0～10V DC 或 4～20mA 连续控制信号，对以 24V AC 供电的电动机的出轴位置进行控制，使阀门位置与控制信号成比例关系，从而使阀位按输入的信号，实现正确的定位，故得名阀门定位器。如图 2.60 所示电子阀门定位器原理示意图。

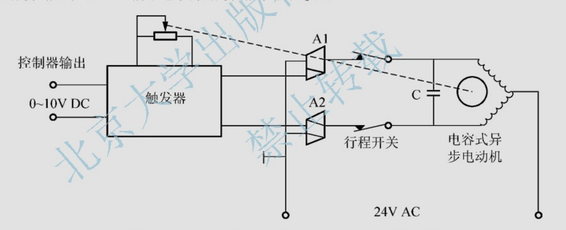


图 2.60 电子阀门定位器原理示意图(A1、A2 为双向可控硅)

当输入信号 AO(0～10V DC)使双向可控硅 A1 导通时，电动机向正向方向转动，开大阀门，进行调节。与此同时，电动机通过减速装置改变反馈电位器，实现负反馈，依靠反馈信号，准确地转换阀门的行程。当 AO 信号使 A2 导通时，电动机向相反方向转动，关小阀门，进行调节。由于控制器 AO 信号是与偏差成 PID 调节规律，故称为 PID 调节。应说明，在 HVAC 领域，多使用 PI 规律，一般不使用微分 D 调节。

2）执行机构的安装

如图 2.61 和图 2.62 所示分别是水阀驱动器构造示意图和电气接线图。

3）连续调节时执行机构与 DDC 控制器的连接

如图 2.63 所示阀门执行机构与控制系统的连接图。控制器经计算得到阀门开度信号设定值，并经 AO 通道送入执行机构内的比较器。比较器将阀门开度实测值与设定值比

较。当设定值高于实测值时，正转电路导通，使阀门电机正向旋转，继续开大阀门；当设定值低于实测值时，反转电路导通，阀门电机反转，阀门关小；当比较器的输出电压绝对值小于两路触发器需要的翻转阈值时，阀门电机停止运行，完成调节。

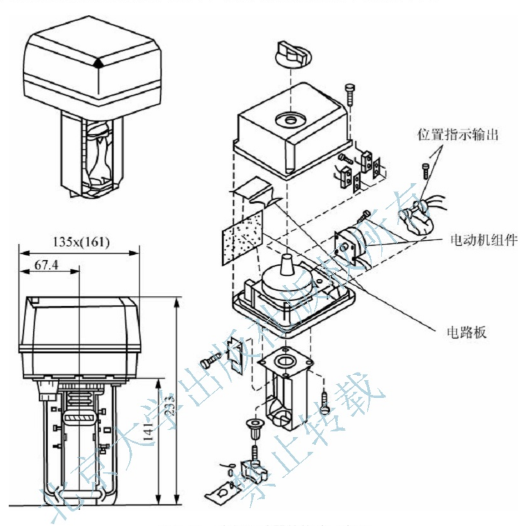


图 2.61　水阀驱动器的构造示意图

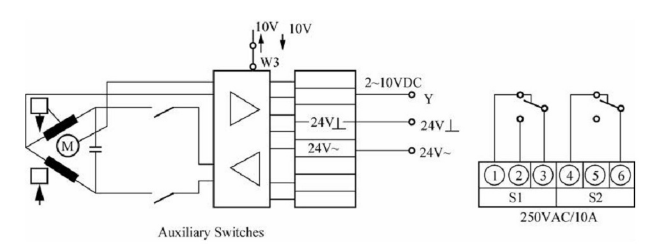


图 2.62　水阀驱动器的电气接线图

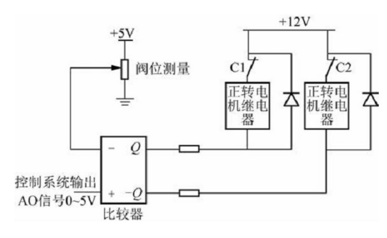


图 2.63 阀门控制器与控制系统的连接

C1，C2—阀门行程限位器触点

2. 阀门

阀门根据结构可分为直通阀和三通阀(三通阀仅适用于水路的控制)。选择阀门除应注意按工艺参数计算口径和选择流量特性外，还应注意阀体材料、连接方式，以及正、反作用等。



直通阀的结构形式

直通阀有直通单座阀、直通双座阀和角形阀等结构形式。

(1) 直通单座阀的阀体内只有一个阀芯和阀座如图 2.64(a)所示。这种阀结构简单，价格便宜，关闭时泄漏量小。但由于阀座前后存在压力差，对阀芯产生的不平衡力较大，所以单座阀仅适用于低压差的场合。

(2) 直通双座阀阀体内有两套阀芯和阀座如图 2.64(b)所示。流体作用在上、下阀芯上的推力方向相反，大致可以抵消，所以不平衡力小，可使用在阀前后压差较大的场合。双座阀的流通阻力比同口径的单座阀大。双座阀比同口径单座阀能流过更多的介质，流通能力大约可提高 20%～25%。由于两个阀芯不易保证同时关紧，所以关闭时的泄漏量较大。

(3) 角形阀的阀体为角形如图 2.64(c)所示。角形阀其他方面的结构与单座阀相似。这种阀流路简单，阻力小，阀体内不易积存污物，所以特别适合高粘度、含悬浮颗粒的流体控制。

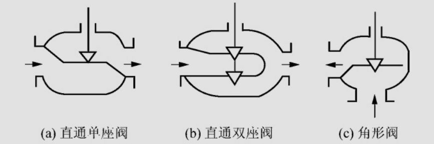


图 2.64 直通调节阀阀体的主要类型

三通阀的工作原理

三通阀的阀体上有三个通道与管道相连，按其作用方式可分为合流阀和分流阀两种。合流阀是把两路介质合成一路，如图2.65所示。当阀芯关小一个入口的同时，就开大另一个入口。分流阀则把一路介质分为两路，在关小一个出口的同时，开大另一个出口。一般来说，三通分流阀不得用作三通混合阀，三通混合阀不宜用作三通分流阀。

可以认为三通阀基本上能保持总流量的恒定，起着调节流量分配的作用。但实际上，由于阀门各支路的特性不同，三通阀要完全做到水流量的恒定是不可能的。在其全行程的范围内，总是存在一定的总水量波动情况，其波动范围在0.9～1.015。

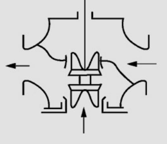


图2.65 合流型三通阀

3. 调节阀流量特性及口径的选择

1）调节阀的流量方程式

从流体力学的观点看，调节阀是一个局部阻力可以变化的节流元件。对不可压缩的流体，由能量守恒原理可推导出调节阀的流量方程式为

$$q=\frac{F}{\sqrt{\zeta}}\sqrt{\frac{2(p_1-p_2)}{\rho}}=\frac{\pi D^2}{4\sqrt{\zeta}}\sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$

式中 q——流体流经阀的流量，m^3/s；

p_1、p_2——进口端和出口端的压力，MPa；

F——阀所连接管道的截面面积，m^2；

D——阀的公称通径，mm；

ρ——流体的密度，kg/m^3；

ζ——阀的阻力系数。

可见当F一定，(p_1-p_2)不变时，流量仅随阻力系数变化。阻力系数主要与流通面积(即阀的开度)有关，也与流体的性质和流动状态有关。调节阀阻力系数的变化是通过阀芯行程的改变来实现的，即改变阀门开度，也就改变了阻力系数，从而达到调节的目的。阀门开得越大，ζ将越小，则通过的流量将越大。

2）调节阀的流量特性及其选择

(1) 调节阀的流量特性。

$$\frac{q}{q_{max}}=f\left(\frac{l}{l_{max}}\right)$$

式中 q/q_{max}——相对流量，即调节阀在某一开度的流量与最大流量之比；l/l_{max}——相对开度，即调节阀某一开度的行程与全开时行程之比。

一般说来，改变调节阀的阀芯与阀座之间的节流面积，便可控制流量。但实际上由于各种因素的影响，在节流面积变化的同时，还会引起阀前后压差的变化，从而使流量也发生变化。为了便于分析，先假定阀前后压差固定，然后再引申到实际情况。因此，流量特性有理想流量特性和工作流量特性之分。

调节阀的理想流量特性是指在阀前后压差固定情况下的流量特性，它由阀芯形状决

定。典型理想特性有直线特性、等百分比(对数)特性、快开特性和抛物线特性如图 2.66 所示。调节阀特性见表 2-9。

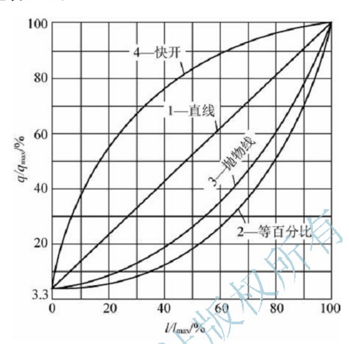


图 2.66 直通调节阀理想流量特性

表 2-9 调节阀特性

理想特性	特性公式	应用场合
直线特性	$\frac{dq/q_{max}}{dl/l_{max}}=K$；$\frac{q}{q_{max}}=K\frac{l}{l_{max}}+C$ K，C—常数	① S 值基本固定 ② S 值大 ③ 负荷变化小(不经常处于小开度或大开度下工作)
对数(等百分比)特性	$\frac{dq/q_{max}}{dl/l_{max}}=K\frac{q}{q_{max}}$ $\ln\frac{q}{q_{max}}=K\frac{l}{l_{max}}+C$	① 适于热水加热器控制，调节平稳，有自适应能力 ② S 值小或变化大 ③ 负荷变化大(经常处于小开度或大开度下工作)

注：S 是阀门能力，也称阀权度。

从上式可以看出直线流量特性阀相对流量与阀相对行程为直线关系；而对数特性阀相对流量的对数值与阀相对行程为直线关系，这就是对数特性阀名称的由来。当行程变化 10%时，其相对流量由 q_1/q_{max}变化到 q_2/q_{max}，则$(q_1-q_2)/q_1$称变化流量对于原流量的相对变化流量。对于直线特性阀此值在小开度时相对变化流量大，而大开度时相对变化流量小。对于对数特性阀，此相对变化流量均为 40%，故对数特性阀又称等百分比特性阀。对数特性阀的放大系数即曲线斜率 K_v是随着相对开度的增加而增大的。

在实际使用时，调节阀安装在管道系统上，阀前后的压差不能保持恒定。因此，在同一相对开度下，通过调节阀的流量将与理想特性时所对应的流量不同。所谓调节阀的工作

流量特性是指调节阀在前后压差随负荷变化的工作条件下，它的相对流量与相对开度之间的关系。直通调节阀与管道和设备串联的系统及其压差变化情况如图 2.67 所示。

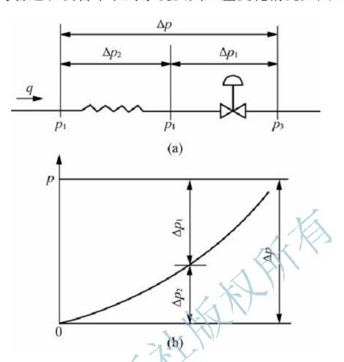


图 2.67　管道串联时直通调节阀压差变化情况

工作特性与阀门能力 S 值有关。阀门能力是阀全开时阀上的压差与系统总压差之比值。当阀门全开时的压降为 Δp_{1m}，串联管路及设备上的压降为 Δp_2，则阀门能力 $S=\Delta p_{1m}/\Delta p_{1m}+\Delta p_2$。不同 S 值的工作特性如图 2.68 所示，可根据 S 值按表 2-10 选择调节阀流量特性。图中 q_{100} 表示管道有阻力时，调节阀全开时的流量。

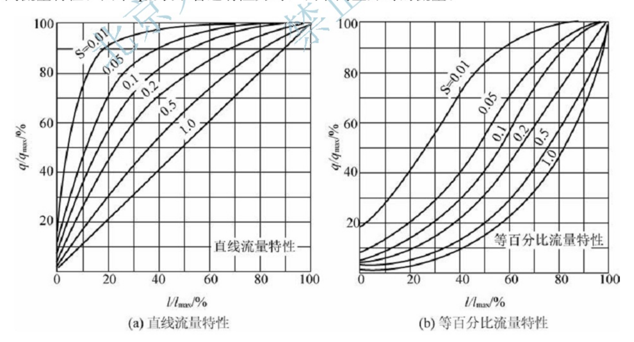


图 2.68　串联管道时调节阀的工作流量特性(以 q_{100} 作参比值)

表 2-10 不同 S 值的工作特性

配管状态	S＝1～0.6		S＝0.6～0.3		S＜0.3
理想特性	直线	对数	直线	对数	不宜调节
实际特性	直线	对数	直线或接近直线	对数或接近直线	不易调节

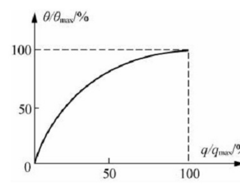


图 2.69 水-水换热器静特性

（2）换热器特性。换热器静特性是指被加热的流体的相对温升 θ/θ_{max} 与热媒的相对流量 q/q_{max} 之间的关系。水-水换热器的静特性如 2.69 所示，可见其特性的斜率即换热器的放大系数 K_0 不是常数，而是随着相对流量的增加而递减。这是由于相对流量增加使供、回水温差减小，其结果虽然相对流量增加，但热交换量却没有明显增加，甚至使静特性趋于饱和。汽-水换热器特性则近似直线特性。这是由于蒸汽总是具有相同温度，而冷凝的潜热随着压力的变化，只在很小的范围变化，所以汽-水换热器的相对温升与相对流量成直线关系。当然，这是指汽-水换热器在蒸汽作自由冷凝时，才具有线性特性。

（3）调节阀流量特性的选择。空调所使用的调节阀特性有对数特性、直线特性及介于两者之间的抛物线特性。对于直通调节阀可用对数特性代替抛物线特性。因此，在选择阀门特性时，更多的指如何选择对数特性阀和直线特性阀。

① 对数(等百分比)特性阀应用场合。

a）控制水-水换热器。用阀随负荷增加而递增的放大系数 Kv 来补偿水-水换热器随负荷增加而递减的放大系数 K_0，以补偿换热器的非线性影响，即

$$K_v \cdot K_0 = 常数$$

保证系统的开环放大系数 K 不随负荷变化而变化，使系统在调试阶段整定好的调节器参数也可以不变，使系统既可稳定地运行，又可以减小静差，使系统获得自适应能力。

b）管道阻力大时，即 S 值小或者阀前后压差变化比较大(即 S 变化大)的情况，使用等百分比特性阀。

c）当系统负荷大幅度变动时，等百分比特性的放大系数随开度增大而增大，并且各开度处的流量相对值变化为一定值，因此对负荷变化具有较强的适应性。

② 直线特性阀应用场合。

a）阀前后压差一定。

b）阀上压差大，即 S 值大。

c）负荷变化小(因为直线特性阀在小流量时不稳定)。

3）调节阀口径的计算与选择

目前，国内许多工程中调节阀门的选择，特别是选择阀门口径时，随意性现象较为严重。有的直接选择调节阀门口径与管径一致，或者相对管径缩小一号。其实，阀门口径过

小会使系统的容量达不到要求，也使得阀门前后压差变大，加重泵的负荷，阀门易受损害；阀门口径过大会使控制性能变差，易使系统受冲击和振荡，而且投资也会增加。因此，选择适当的阀门口径，对系统的正常运转是非常重要的。

要正确选择阀门，需先求出阀门流通能力 K_v(计算公式参见表 2-11)，然后按厂家给出的资料确定阀门口径。在表 2-11 中，应注意公式的单位，按表中给出的公制单位计算出的流通能力用 K_v表示。K_v的定义是：阀全开，阀两端压差为 10^5 Pa，水的密度为 $1g/cm^3$ 时，每小时流经阀的流量数(m^3/h)。

表 2-11 调节阀流通能力计算公式

应用场合		K_v公式	单位
液体		$\dfrac{316q}{\sqrt{\dfrac{p_1-p_2}{\rho}}}$	q——流体流量(m^3/h) p_1，p_2——阀前后绝对压力(Pa) ρ——流体密度(g/cm^3)
蒸汽	$\dfrac{p_2}{p_1}>\dfrac{1}{2}$	$\dfrac{10q}{\sqrt{\rho(p_1-p_2)}}$	q——蒸汽流量(kg/h) p_1，p_2——阀前后绝对压力(Pa) ρ——阀出口断面处蒸汽密度 ρ_{2KP}——超临介状态下，出口断面处蒸汽密度
	$\dfrac{p_2}{p_1}<\dfrac{1}{2}$	$\dfrac{14.14q}{\sqrt{\rho_{2KP}p_1}}$	

特别提示

阀门流通能力如按美制单位计算，则用 C_v表示。在一些技术资料上常有这种表示方式。

C_v的定义为 60 °F 清水，阀上压降为 1 LbF/in^2 时，每分钟流过的水量(gal)。C_v与 K_v的关系为：

$$C_v=1.167K_v$$

举 例

如图 2.70 所示加热系统，流过加热盘管的流量为 $q=31m^3/h$，热水温度为 80℃，$p_m-p_r=1.7\times10^5$ Pa，求 K_v值是多少？

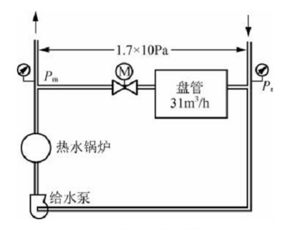


图 2.70 加热系统

根据题意 $q=31\text{m}^3/\text{h}$，查80℃热水密度 $\rho=0.971\text{g/cm}^3$，管网入口压差 $p_m-p_r=1.7\times10^5\text{Pa}$，而热水直通阀上的压差 Δp_v 按 $S=0.5\sim0.7$ 计算，即

$$\begin{aligned}\Delta p_v &= (0.5\sim0.7)\times(p_m-p_r)\\ &= (0.5\sim0.7)\times1.7\times10^5\text{Pa}\\ &\approx 1\times10^5\text{Pa}\end{aligned}$$

则

$$K_v=\frac{316q}{\sqrt{\dfrac{\Delta p_v}{\rho}}}=\frac{316\times31}{\sqrt{\dfrac{1\times10^5}{0.971}}}=30.5$$

选择合适口径的电动调节阀，以保证阀门有一定的阀权度和阀门流量特性。在以往的工程应用中，常常依据水力管径选择电动调节阀口径。这样选择可能使阀门管径过大。过大的调节阀口径会使阀门的阀权度变小，流量特性变差。阀门在小开度下频繁动作(超调或欠调反复动作)，加剧阀门的磨损，严重时可使控制系统振荡，系统稳定性变差。此外，当阀口径过大时，造价也高。所以正确选择调节阀特性和口径，可以提高调节系统的调节品质。

系统集成商在工程投标时，一般是不知调节阀的流量和阀前后的压力，在这种情况下，怎样利用表 2-11 中的公式计算呢？按照冷负荷 Q_c 与冷冻水质量流量 M 的关系为 $Q_c=cM(t_2-t_1)$(式中，Q_c 为冷负荷，kW；c 为水比热，4.186kJ/(kg·℃)；M 为质量流量，kg/s；t_1、t_2 为冷水供、回温度，℃)。

按 $t_1=7$℃，$t_2=12$℃，$(t_2-t_1)=5$℃，则可计算出水流量(体积流量)q 与冷量 Q_c 的关系为：

$$q=0.17225Q_c$$

式中　q——冷水流量，m^3/h；

Q_c——设计冷量，kW，可取相应空调机组的额定冷量。

上式中的阀前后压力差(p_1-p_2)，通常可取为 40000Pa。有了流量 q 和压力差(p_1-p_2)就可以近似地计算调节阀流通能力 K_v 值，按照供应商给出的阀门资料确定阀门口径。按照上述计算的调节阀口径，一般比安装管径小两号。

特别提示

在房间风机盘管系统中，采用电动两通阀或电动三通阀控制冷/热水路的开关。其开关动作由双位式控制器控制。电动调节阀的电动机是磁滞式电动机，由220V AC供电。当供电时，电动机转动，通过机械齿轮驱动开阀。当阀门打开后，允许电动机带电堵转；但当电动机断电后，阀门在返回弹簧作用下关闭。系统带有手动操纵杆。因为是开、关控制规律，所以阀门口径只需与工艺管径一致就可以了。

2.4.3 电磁阀

电磁阀是常用电动执行器之一，如图 2.71 所示。其利用电磁铁的吸合和释放对小口径阀门进行“通”、“断”2种状态的控制。DDC经DO通道输出数字信号控制电磁阀线圈的通断。线圈通电后，产生电磁吸力提升活动铁芯，带动阀塞运动控制流体流量通断。

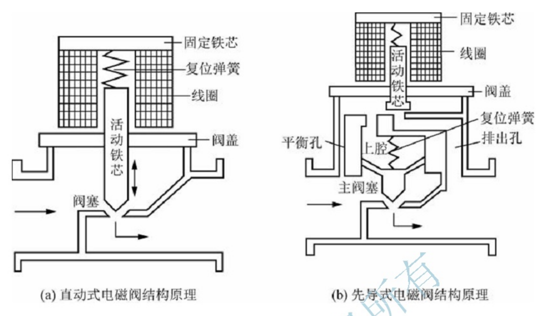


图 2.71 电磁阀

电磁阀有直动式和先导式两种。图 2.71(a)为直动式电磁阀，这种电磁阀的活动铁芯本身就是阀塞，通过电磁吸力开阀，失电后，由恢复弹簧闭阀。图 2.71(b)为先导式电磁阀，由导阀和主阀组成，通过导阀的先导作用促使主阀开闭。线圈通电后，电磁力吸引活动铁芯上升，使排出孔开启，由于排出孔远大于平衡孔，导致主阀上腔中压力降低，但主阀下方压力仍与进口侧压力相等，则主阀因差压作用而上升，阀呈开启状态，断电后，活动铁芯下落，将排出孔封闭，主阀上腔因从平衡孔冲入介质压力上升，当约等于进口侧压力时，主阀因本身弹簧力及复位弹簧作用力，使阀呈关闭状态。

电磁阀结构简单，价格低廉，多用于双位控制系统中。

2.4.4 两位旋转阀

两位旋转阀由电动执行机构使阀芯产生角位移来开启和关闭阀门，这种阀门可分为球阀、蝶阀和多叶阀，下面主要介绍球阀和蝶阀。

1. 球阀

球阀是近年来广泛采用的一种新型阀门，主要用于切断、分配和改变管路中介质的流动方向。球阀由旋塞阀演变而来，有旋转 90°的动作，旋塞体是球体。球阀具有截止阀或闸阀的作用，和截止阀和闸阀相比，具有阻力小、密封性能好、机械强度高、耐腐蚀等特点。球阀按结构不同，可分为浮动球球阀、固定球球阀、弹性球球阀。

2. 蝶阀(图 2.72)

蝶阀也叫做翻板阀，是一种结构简单的调节阀，可用于低压管道的开关控制。蝶阀结构简单、体积小、质量轻，只由少数几个零件组成，只需旋转 90°即可快速启闭，操作简单。蝶阀处于完全开启位置时，蝶板厚度是介质流经阀体时唯一的阻力，因此压力降很小，具有较好的流量控制特性。常用的蝶阀有对夹式蝶阀和法兰式蝶阀两种：对夹式蝶阀是用双头螺栓将阀门连接在两管道的法兰之间；法兰式蝶阀是阀门上带有法兰，用螺栓将阀门上两端法兰连接在管道法兰上。







图 2.72 蝶阀

特别提示

电动旋转阀的传动装置如果不能反向运转时，则其传动装置必须配备复位装置。带有复位装置的电动两位阀一般用于突然停电或系统故障时必须复位的控制系统。值得注意的是，大部分电动两位阀同时具有双位控制和连续控制的功能，但其连续控制性能不如电动调节阀，一般只能用于控制精度要求不高的场所。



知识链接

建筑系统中的常用阀门简介

楼宇自控技术人员在阅读暖通空调、给排水专业的图纸时，常常会碰到一系列的阀门，如图 2.73 所示。这些阀门用来调节水压、调节管道水流量大小及切断水流、控制水流方向。下面略作介绍。

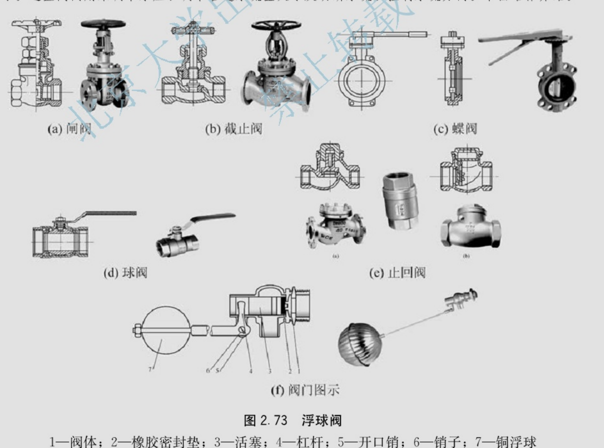


图 2.73 浮球阀

1—阀体；2—橡胶密封垫；3—活塞；4—杠杆；5—开口销；6—销子；7—铜浮球

(1) 闸阀。此阀全开时水流呈直线通过，阻力小。但水中有杂质落入阀座后，会导致闸阀不能关闭到底，因而产生磨损和漏水。

(2) 截止阀。此阀关闭后是严密的，但水流阻力较大。

(3) 蝶阀。此阀为盘状圆板启闭件，是通过绕其自身中轴旋转改变管道轴线间的夹角，而控制水流通过的阀门。具有结构简单、尺寸紧凑、启闭灵活、开启度指示清楚、水流阻力小等优点。

(4) 球阀。具有截止阀或闸阀的作用，和截止阀和闸阀相比，具有阻力小、密封性能好、机械强度高、耐腐蚀等特点。

(5) 止回阀。止回阀用来阻止水流的反向流动，有两种类型：一种是升降式止回阀，装于水平管道上，水头损失较大，只适用于小管径；另一种是旋启式止回阀，一般直径较大，水平、垂直管道上均可装置。止回阀安装都有方向性，阀板或阀芯启闭既要与水流方向一致，又要在重力作用下能自动关闭，以防止常开不闭的状态。

(6) 自动水位控制阀. 给水系统的调节水池(箱)，除进水能自动控制切断进水之外，其进水管上应设自动水位控制阀。水位控制阀的公称直径应与进水管管径一致。常见的有浮球阀、液控浮球阀、活塞式液压水位控制阀、薄膜式液压水位控制阀等。

特别提示

给水管道上使用的阀门应根据使用要求按下列原则选型：需调节流量、水压时，应采用闸阀；要求水流阻力小的部位(如水泵吸水管上)的阀门，宜采用闸阀；安装空间小的场所，宜采用蝶阀、球阀；水流需双向流动的管段上的阀门，不得使用截止阀。

2.4.5 电动调节风门

在空调、通风系统中，常用电动调节风门控制风量。电动调节风门由电动执行机构和风门组成。风门的结构原理如图 2.74 所示。风门由若干叶片组成，当叶片转动时改变流道的等效截面积，即改变了风门的阻力系数，其流过的风量也就相应地改变，从而达到了调节风流量的目的。叶片的形状将决定风门的流量特性，同调节阀一样，风门也有多种流量特性供应用选择。

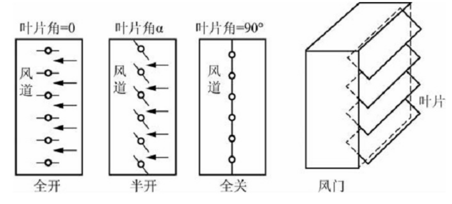


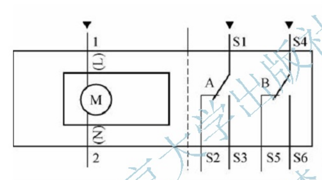
图 2.74 风门的结构原理

风门的执行机构可以是电动的，也可以是气动的。在 BAS 中一般采用电动式风门，有可实现 PID 控制的连续调节的风门，还有通断式的风门。

如图 2.75 所示某品牌的风门驱动器(执行机构)。如图 2.76 和图 2.77 所示分别是开关型和模拟型风门驱动器的电气接线图。



图 2.75　GDB/GLB/GIB/GBB/GCA Open-Air 系列风门执行器



连接内容	端子号	线色	内容
供电电源	1	褐色	24V DC
	2	蓝色	24V接地
A辅助开关	S1	灰/红	开关A输入
	S2	灰/蓝	开关A动断
	S3	灰/粉红	开关A动合
	S4	黑/红	开关B输入
	S5	黑/蓝	开关B动断
	S6	黑/粉红	开关B动合

图 2.76　开关型风门执行器的电气接线

连接内容	端子号	线色	内容
供电电源	1	红	24V DC
	2	黑	24V接地
	3	灰	输入0～10V DC
	4	粉红	位置指示2～10V DC
A辅助开关	S1	灰/红	开关A输入
	S2	灰/蓝	开关A动断
	S3	灰/粉红	开关A动合
	S4	黑/红	开关B输入
	S5	黑/蓝	开关B动断
	S6	黑/粉红	开关B动合

图 2.77　模拟型风门执行器的电气接线

如图 2.78 所示风门及风门驱动器的规格尺寸及安装。

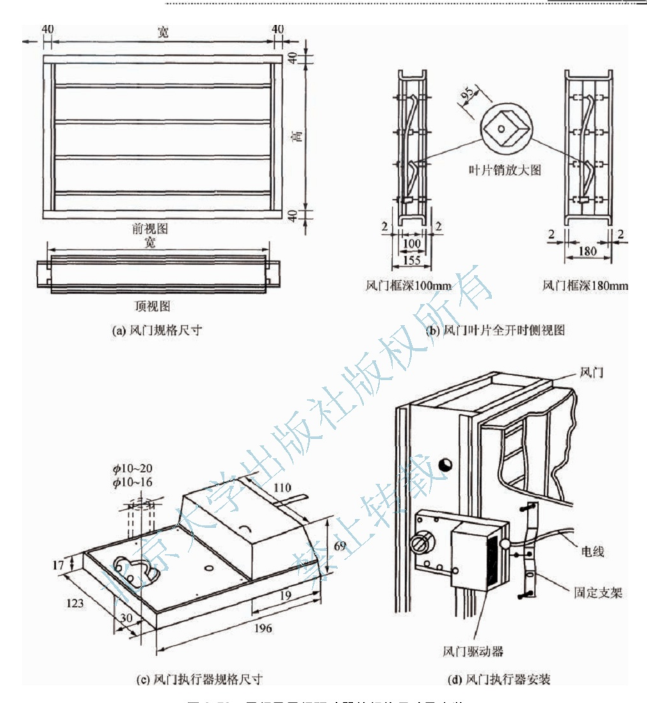


图 2.78 风门及风门驱动器的规格尺寸及安装

本章小结

本章主要就 BAS 的现场控制设备(控制器、传感器、执行器)进行了深入的介绍，是对第 1 章所学的建筑设备自动化系统入门知识的进一步深化。通过本章的学习，读者将深入了解 BAS 的硬件设备组成，为 BAS 在暖通空调、给排水、照明等机电设备中的应用打好基础。

BAS 是一种基于计算机等现代技术的、由软件和硬件组成的自动控制系统。简单的

自动控制系统由测量变送器、控制器和执行器和被控对象组成。计算机控制系统则以计算机系统作为控制器，执行控制算法或控制策略。BAS中的DDC控制器就是一种用于建筑设备控制的特殊的计算机。计算机控制系统有操作指导控制系统、直接数字控制系统、计算机监督控制系统、集散控制系统、总线控制系统等多种类型。DCS在工业控制领域和楼宇自动控制领域都得到了广泛应用，是过程控制领域的主流控制系统。目前在工程应用中，BAS产品大多是基于DCS的，并将DCS、FCS和计算机网络等技术相互融合在一起。

DDC控制器，也称为下位机，是BAS的核心设备。DDC控制器可以独立运行，实现对建筑机电设备系统的监控，可以通过通信接口与其他DDC控制器通信，也可以通过通信网络接受中央管理计算机的统一管理与优化管理。DDC控制器有AI、AO、DI、DO四种I/O通道。模拟量通道一般采用屏蔽线缆，数字量通道一般采用非屏蔽线缆。

在建筑系统中，绝大多数的受控过程使用闭环控制。为了保证闭环回路的稳定，控制器需要采用合适的控制规律。常用的最基本的控制规律有双位控制、比例(P)控制、积分(I)控制、微分(D)控制。其中积分控制和微分控制不单独使用，往往与比例控制组合为PI控制和PID控制。在建筑系统中，大多数的闭环控制回路采用比例积分微分(PID)控制。

传感器是一种能把特定的被测量信息按一定规律转换成电信号输出的器件。开关量传感器(如压差开关、水流开关、液位开关、防冻开关等)的输出可直接与控制器的DI通道相连，用作状态报告或软件联锁。模拟量传感器(如温度、湿度、流量、压力、液位、照度及电路参数等传感器)将生产过程中的模拟量参数转换为连续的电信号，然后经信号处理电路将该电信号变成0～10V或4～20mA等标准信号。

执行器根据控制器送入的控制信号执行控制动作，调节能量或物料等被测介质的输送量。执行器由执行机构和调节机构两部分组成。执行机构是执行器的推动部分，它接受来自控制器的控制信号，并根据控制信号的大小产生位移信号。调节机构是执行器的调节部分。最常见的调节机构是调节阀，它接受执行机构输出的位移信号的操纵，改变阀芯与阀座的流通面积，控制工艺介质的流量或能量。阀门根据结构可分为直通阀和三通阀(三通阀仅适用于水路的控制)。选择调节阀除应注意按工艺参数计算口径和选择流量特性外，还应注意阀体材料、连接方式，以及正、反作用等。在BAS中常用的执行器有电动调节阀、电磁阀、电动调节风门、电动蝶阀、电动闸阀等。

本章还适当穿插介绍了当前楼宇自控市场上主流品牌产品，这将有助于读者对实际工程应用的了解。

习　　题

1. 简述简单的自动控制系统的组成，并绘制其组成方框图。
2. 简述计算机控制系统的组成，并绘制其组成方框图。

3. 计算机控制系统有哪些类型?
4. 与早期的集中控制系统比较，集散控制系统具有怎样的优势?
5. 简述集散控制系统的体系结构。
6. 简述现场总线控制系统的体系结构。
7. 简述现场总线控制系统的主要特点。
8. 为什么说 DDC 控制器是 BAS 的核心设备?
9. 根据 DDC 的结构，DDC 有哪两种基本类型?
10. DDC 控制箱有什么作用?
11. DDC 有哪几种输入/输出通道(I/O 通道)?
12. 归纳总结 DDC 的 I/O 通道与现场仪表之间的连接方式。
13. 利用互联网搜集三家品牌的楼宇自控系统的 DDC 产品，列出主要信息，如产品名称、品牌、产地、主要技术参数、接口特性等。
14. 归纳总结双位控制、比例(P)控制、积分(I)控制、微分(D)控制、PI 控制和 PID 控制的数学表达式、特性曲线、特点和应用场合。
15. 开关量传感器和模拟量传感器分别有什么特点?
16. 开关量传感器、模拟量传感器与 DDC 控制器如何连接?
17. 传感器输出的标准信号主要有哪几种?
18. 简述传感器的发展趋势。
19. 温度传感器的感温元件一般有哪些?
20. 怎样进行温度传感器的选型?
21. 比较温度传感器的三种接线方式。
22. 安装温度传感器有哪些注意点?
23. 简述电容式湿度传感器的工作原理。
24. 常用的感压元件有哪些?
25. 简述电容式、压阻式和应变片式压力(压差)传感器的工作原理。
26. 检测流量有哪些方法?
27. 简述涡街流量计、电磁流量计和超声波流量计的工作原理。
28. 空气质量传感器主要是用于检测空气的哪些成分?
29. 电量变送器主要是测量哪些参数?
30. 简述热量计量仪表的计量原理。
31. 常用的开关量传感器有哪些? 分别有什么作用?
32. 执行器由哪两部分组成? 分别有什么作用?
33. 执行器与控制器之间怎样连接?
34. 简述电动调节阀的组成。
35. 简述电动调节阀执行机构的工作原理。
36. 连续调节时执行机构与 DDC 控制器如何连接?

37. 写出调节阀的流量方程式。

38. 分析调节阀的理想流量特性和实际流量特性。

39. 如何选择调节阀的口径?

40. 简述电磁阀的特点和应用场合。

41. 简述电动调节风门的组成。

42. 利用互联网，搜集楼宇自控系统中常用的传感器和执行器产品资料。





第 3 章

给排水系统的控制

教学目标

通过本章的学习使学生了解智能建筑给排水系统的运行原理，掌握 BAS 给排水系统中的水泵、水箱监控，掌握相应的监控原理图绘制及 BAS 设备配置，并在监控原理图基础上掌握二次接线图设计，学会解决 BA 工程问题中“给排水”监控的常见问题。

教学步骤

能 力 目 标	知 识 要 点	权重	自测分数
给排水系统构成	给水系统的运行原理	5%	
	排水系统的运行原理	5%	
给排水系统监控设计	给水系统中加压水泵、水箱、水池等设备的监控点位设置	10%	
	给水系统监控原理图	15%	
	排水系统设备的监控点位设置	10%	
	排水系统监控原理图	15%	
	二次接线图设计	15%	
室内热水供应系统的监控设计	室内热水供应系统的分类及组成	5%	
	热水加热的方法	5%	
	室内热水供应系统的监控	15%	

▶▶章节导读

智能建筑给排水系统的控制是BAS的重要组成部分之一。读者首先会问，智能建筑给排水系统的监控有什么作用？给排水系统的监控是如何实现的？3.1节正好可以让读者知道智能建筑给排水系统监控的构成与设计要素。

读者会接着问，智能建筑室内给排水系统的运行原理是什么？其实，智能建筑室内给排水系统的类别有很多，不同种类给排水系统的构成方式也不同，了解了智能建筑给排水系统的构成，也就了解了给排水系统控制的目标。因此，有必要了解智能建筑给排水系统运行原理的基本知识，这可以从3.2节和3.4节中获得。

接下来，读者可能还想知道室内给排水系统监控应该如何去设计？3.3节和3.5节就给读者介绍了智能建筑室内给排水系统的监控原理以及二次接线图的设计。此外，3.6节还补充介绍了室内热水供应系统的运行原理及其监控。

通过本章对智能建筑室内给排水系统运行原理和监控原理的具体介绍，读者将可以从整体上认知给排水系统监控的设计要素，并能进行监控原理图的绘制。



引例

随着城市的都市化发展，人们所居住的建筑逐渐变成了高层建筑，在高层建筑中生活，人们每天都要饮水、洗漱，打开水龙头水就以一定的速度流出，用后的废水又会自动被排放到指定的处理系统中。但对于整个过程是如何进行监控的？一旦给排水环节出现了故障，又是通过什么方式能第一时间找出问题原因呢？

建筑给水系统从室外给水管网或水池引水，由管道输送，通过各种阀门启闭水流或调节流量，送至建筑物内的各个用水点后，由水龙头等用水附件将水量进行分配；当建筑物是高层建筑时，将选用串联分区、并联分区、减压分区等供水方式进行给水；而建筑物排水系统的任务是将室内卫生设备产生的生活污水等有组织地及时通畅地排至室外排水管网、处理构筑物或水体。在建筑给排水结构的基础上，BAS对给排水系统设备监控功能的要求是：给水系统水泵自动启停控制及运行状态显示；水泵故障报警；水箱液位监测、超高与超低水位报警。污水处理系统的水泵启停控制及运行状态显示；水泵故障报警；污水集水井、中水处理池监视、超高与超低液位报警；漏水报警监视。如何对这些监控点进行设置，都是本章所要讨论的重点内容。

根据建筑物对水量、水压、水质的要求以及建筑物的具体情况，首先得到建筑给水系统工艺流程，然后进行给排水监控子系统设计，具体施工，验收合格才能交付使用。本章主要介绍给排水系统的基础知识以及给排水系统的监控原理与设计方法，为读者能够进行BAS给排水系统监控图设计做好铺垫。



案例小结

对大楼的室内给排水系统进行监控，实现大厦内的给排水智能化管理，使用户能够获得稳定、便捷的水资源。整个监控体系不仅包含对水箱、水泵的控制，而且通过监控点的设置还可以快速地查找问题根源，体现了智能建筑的人性化价值。

3.1 概　　述

3.1.1 建筑给排水的工程范围

在建筑物中可靠、经济、安全地为人们的生活和生产活动提供充足、优质的水源，并将使用后的水进行一定的水质处理使之符合环保要求后再排入城市管网或自然水系是建筑给排水工程的任务。其工程范围包括建筑给水、热水供应、消防给水、建筑排水、建筑中水、小区给排水和建筑水处理等多项内容。

3.1.2 建筑给排水的监控方法

实现建筑给排水系统等建筑设备自动化的方法很多，本书关注的是利用 BAS 实现对建筑设备的监控。本章将介绍建筑内部的给水、排水系统的基本知识及 BAS 对其的监控方法。建筑中水、排水的水处理装置都有自身完整的控制系统，BAS 对其的监控处理方法类似于对冷水机组、锅炉的处理方法，一般不去直接控制。对于消防给水的监控，按照我国现行的消防管理要求，由消防系统统一控制管理，不直接纳入到 BAS 中。限于篇幅，本章主要讨论 BAS 对建筑给水、建筑排水、热水供应的监控。

3.1.3 BAS 对建筑给排水系统监控的一般思路

1. 问题的提出

如图 3.1(a)、(b)所示分别是典型的给水系统和排水系统运行原理示意图。我们要解决的问题就是利用 BAS 实现对建筑给水、排水系统的监控。

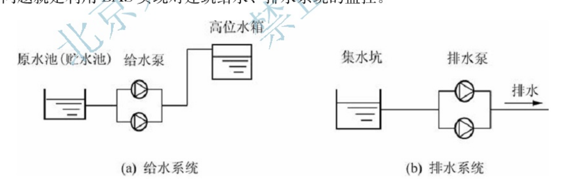


图 3.1　给排水系统工艺流程示意图

2. 问题解决的依据

解决上述问题的依据主要有业主的需求、工程招标书的规定，以及《智能建筑设计标准》(GB/T 50314—2006)等相关标准。

BAS 对给排水系统要求的设备监控功能一般有：给水系统水泵自动启停控制及运行状态显示；水泵故障报警；水箱液位监测、超高与超低水位报警。污水处理系统的水泵启停控制及运行状态显示；水泵故障报警；污水集水井、中水处理池监视、超高与超低液位报警；漏水报警监视。



3. 问题的解决思路

下面以给水系统为例，简要介绍一下 BAS 监控点位设计的思路。

如图 3.2 所示给水系统 BA 监控设计的思路和过程。图 3.2(a)是一幢建筑物的室内给水系统示意图。图 3.2(a)是给排水专业人员绘制的给水系统图。图 3.2(c)是智能化专业人员设计完成的给水系统监控原理图。

(a) 室内给水系统示意图

(b) 给水系统图

(c) 给水系统监控原理图

图 3.2 给水系统 BA 监控设计的思路和过程

因此，学习给水系统监控的前提是具备给水系统的相关知识，能理解相关专业给出的技术资料。只有读懂了给水系统的图纸，才能根据业主需求和设计标准进行建筑设备自动化系统的点位分析与设计。本章将按照这样的思路分析给水系统设备的监控原理和方法，排水系统的分析思路与给水系统类似。

3.2 室内给水系统工艺流程认知

建筑给水水源来自城镇给水管网或自备水源，建筑给水工程包括各类建筑、生产、消防用水。城镇给水系统的任务是自水源取水，进行处理净化达到用水水质标准后，经过管网输送，供城镇各类建筑所需的生活、生产、市政(如绿化、街道洒水)和消防用水。

给水系统按照地域(建筑物内外)可分为室外给水系统和室内给水系统。室外给水系统为室内给水系统提供水源，如城市给水管网或单位的自备水源。本节主要介绍室内给水系统。

3.2.1 室内给水系统的分类

室内给水系统的任务是根据各类用户对水量、水压、水质的要求，将水由城市给水管网(或自备水源)输送到装置在室内的各配水龙头、生产机组和消防设备等各用水点上。

室内给水系统按水的用途分可分为三类：生活给水系统、生产给水系统和消防给水系统。

1. 生活给水系统

生活给水系统主要包括建筑内的饮用、烹调、盥洗、洗涤、淋浴等生活上的用水。生活用水的水质必须严格符合国家规定的《生活饮用水卫生标准》。生活给水系统的用水量可以参照我国《室外给水设计规范》所订生活用水量标准。生活用水管网必须保证一定的水压，通常叫最小自由水压。其值(从地面算起)根据给水区内建筑物层数确定，一层为10米，二层为12米，以后每加一层增加4米。

2. 生产给水系统

生产给水系统的种类繁多，如：生产设备的冷却、原料和产品的洗涤、锅炉用水及某些工业原料用水等。生产用水对水质、水量、水压以及安全方面的要求由于工艺不同，差异是很大的。如：冷库中较大水量用于冷却、冲霜、制冰、生产加工；空调用水则主要为空调供热/冷用水和冷却水系统，一般由循环水和补给水两部分组成，对补给水要求进行水质软化处理。

3. 消防给水系统

消防给水系统是供给层数较多的民用建筑、大型公共建筑及某些生产车间的消防系统(如：消火栓系统、自动喷淋系统、水幕消防系统等)的消防设备用水。消防用水对水质要求不高，但必须按建筑防火规范保证有足够的水量和水压。制冷空调的消防给水应符合国家现行《建筑设计防火规范》的有关规定。

上述三种给水系统可以独立设置，也可按水质、水压、水温及室外给水系统情况，考虑技术、经济和安全条件，由其中的两个或三个系统组成不同的共用系统。如生活、生产、消防共用给水系统，生活、消防共用给水系统，生活、生产共用给水系统，生产、消防共用给水系统。

3.2.2 室内给水系统的组成

室内给水系统的组成如图 3.3(a)所示。建筑物的给水是从室外给水管网上经一条引入管进入的，引入管安装有进户总闸门和计算用水量用的水表，再与室内给水管网连接。为了确保建筑用水的水量和足够的压力，在室内给水管网上往往安装局部加压用水泵，在建筑物底层建贮水池，在建筑物顶层安装水箱。按建筑物的防火要求，还要设置消防给水系统。

室内给水系统的组成详述如下：

(1) 引入管。由室外给水管网引入建筑内管网的管段，也称进户管。

(2) 水表节点。是指安装在引入管上的水表及其前后阀门和泄水装置的总称，水表是用以计量该幢建筑的总用水量的。

(3) 室内给水管网。建筑物内水平干管、立管和横支管。

(4) 给水附件。如，配水龙头、消火栓、喷头与各类阀门(控制阀、减压阀、止回阀等)。

(5) 加压和贮水设备。如，水泵、气压给水装置、变频调速给水装置、水池、水箱等增压和贮水设备。

(6) 室内消防设备。如，室内消火栓、自动喷淋系统的报警阀、水流指示器、水泵结合器、闭式喷头、开式喷头等。

3.2.3 室内给水系统的给水方式

建筑给水系统的给水方式即室内的供水方案。方案的选择应根据建筑物的使用要求、最低水压以及对建筑立面和结构的影响等因素确定。在初步设计时，给水系统所需的压力(自室外地面算起)可估算确定：一层 100kPa；二层为 120kPa。二层以上每增加一层，增加 40kPa。这种估算法一般适用于层高不超过 3.5m 的民用建筑，不适用于高层建筑供水系统。

给水方式最基本的有如下几种。

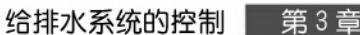
1. 直接给水方式

当室外给水管网的水量、水压在一天中任何时间都能满足建筑室内用水要求时，采用这种方式，如图 3.3 所示。直接给水方式是最简单、最经济的供水方式。但直接给水通常只能达到 15～18m 的建筑高度。大多数的智能建筑属于高层建筑，在大部分的建筑高度上必须采用加压供水的方式。

2. 设水泵和水箱的给水方式

1) 单设水箱的给水方式

当室外给水管网供应的水压大部分时间能满足室内需要，仅在用水高峰出现不足，且允许设置高位水箱的建筑可采取此种给水方式，如图 3.4 所示。该方式在室外管网压力大于室内所需压力时，向水箱进水，当室外管网压力不足时水箱供水。



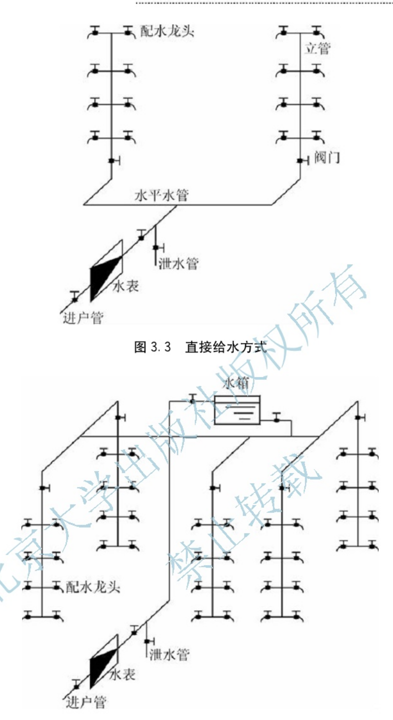


图 3.3 直接给水方式

图 3.4 单设水箱的给水方式

2）单设水泵的给水方式

当室外管网的水量满足室内需要，但压力经常不足时，可采用单设水泵的给水方式，如图 3.5 所示。当室内用水量大而均匀时，如生产车间给水，可用均匀加压。当室内用水量大且用水不均匀时，如住宅、高层建筑等，可考虑采用水泵变频调速供水，使供水曲线与用水曲线接近，并达到节能的目的。水泵直接从室外管网抽水，会使外网水压降低，影响附近居民用水，因此水泵从外网直接抽水时，应征得供水部门的同意。为避免上述问题，可在系统中增设储水池，采用水泵与外网间接连接的方式。

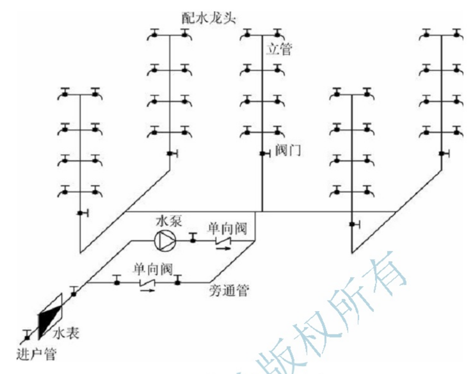


图 3.5 单设水泵的给水方式

3）设水泵、水箱的给水方式

当室外管网的压力经常不足，且室内用水量变化较大时，可采用水泵、水箱联合给水方式，如图 3.6 所示。这种给水方式由于水泵可及时向水箱充水，使水箱容积大为减少。有水箱的调节作用，水泵出水量稳定，可使水泵在高效率下工作。在水箱内设置控制装置，还可使水泵自动启闭。因此，这种方式技术上合理，供水可靠，虽设备费用较高，但长期运行具有较好的经济性。

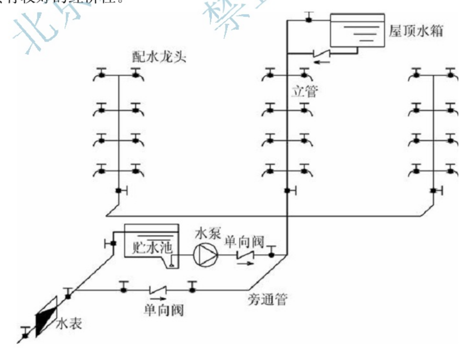


图 3.6 水箱水泵联合给水方式

3. 设气压给水设备的给水方式

当室外管网压力经常不足，且不宜设置高位水箱的建筑物，可采用气压给水方式，如图 3.7 所示。气压给水设备是利用密闭储罐内空气的可压缩性，进行储存、调节送水量和保持水压的增压装置。其作用相当于高位水箱或水塔，可设置在建筑物的高处或低处。气压给水设备有成套的产品，能实现供水控制要求。BAS 对其采用处理方法类似于对冷水机组、锅炉的方式，只需与之通信，而不必去直接控制。

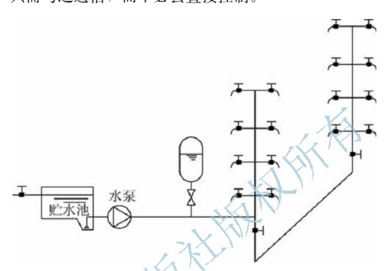


图 3.7 气压给水设备给水方式

4. 分区给水方式

当城市供水压力不足，只能满足建筑物底层的用水而不能供到上部楼层时，为了能充分利用室外管网的压力，常将室内给水系统分为上下两个供水区，如图 3.8 所示，下区直

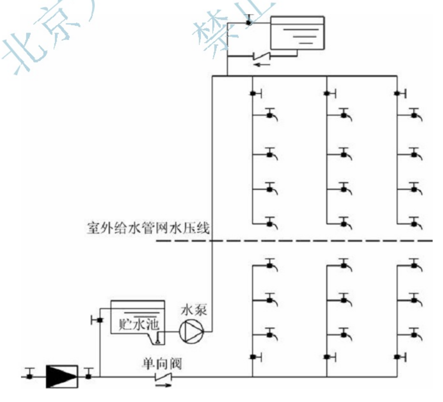


图 3.8 多层建筑分区给水方式

接由室外管网供水，上区由水泵、水箱联合供水(或单设水箱的给水方式)。高层建筑中多采用分区供水系统。

5. 环状给水方式

当建筑物用水量较大，不允许间断供水，室外给水管网水压和水量又不足时，为保证建筑物用水的可靠性，建筑物用水可自城市给水管网上两处引入，在建筑物内构成环状给水系统，如图 3.9 所示。

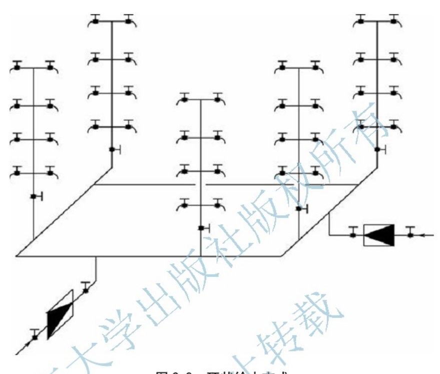


图 3.9 环状给水方式

3.2.4 室内给水水压、水量

生活用水、生产用水、消防用水各自对给水的水质、水量、水压有不同的要求。建筑室内所需的水压、水量是选择给水方式以及给水系统中增压和水量储存调节设备的依据，这也是 BA 系统对给水监控设计的重要依据。本节主要讨论室内给水的水压和水量。

1. 室内给水所需的压力

室内给水应保证各配水点在任何时间内所需要的水量。满足各配水龙头和用水设备需要所规定的出水量即额定流量，所需的最小压力称流出水头。所以室内给水系统所需水压，应保证管网中配水水压最不利点具有足够的流出水头，如图 3.10 所示。管网所需水压 H 的计算式为：

$$H=H_1+H_2+H_3+H_4 \tag{3-1}$$

式中 H_1——引入管起点至最不利配水点的高差，mH_2O；

H_2——引入管起点至最不利配水点的给水管路，即计算管路的沿程与局部水头损失之和，mH_2O；

H_3——水流经水表时水头损失，mH_2O；

H_4——最不利配水点的龙头或用水设备所需的流出水头，mH_2O。

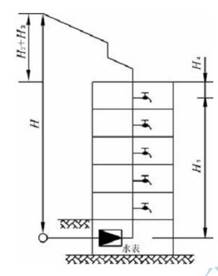


图 3.10 室内给水系统所需压力图

在设计之初，为选择给水方式，判断是否需要设置给水升压及贮水设备，常常需要对建筑给水系统所需压力按建筑层数进行估算，见表 3-1。

表 3-1 按建筑层数估算建筑给水系统所需压力

层数(n)	1	2	3	4	5
需水压/mH_2O	10	12	16	20	24

表 3-1 适用于层高≤3.5m 以下的建筑，该压力为自地平算起的最小保证压力。

2. 室内给水所需水量

1) 生产用水量

一般比较均匀，可按消耗在单位产品上的水量或单位时间内消耗在生产设备上的水量计算确定。

2) 生活用水量

受气候、生活习惯、建筑物性质、卫生器具和用水设备的完善程度及水价等多种因素影响，用水量不等。根据国家制定的用水定额、小时变化系数和用水单位数按下式计算。

最高日用水量：

$$Q_d = mq_d \tag{3-2}$$

最大小时用水量：

$$Q_h = \frac{Q_d}{T} \cdot K_h \tag{3-3}$$

式中 Q_d——最高日用水量，L/d；

m——用水单位数(人或床位等)；

q_d——最高日生活用水量定额，L/(人·d)或 L/(床·d)；

Q_h——最大小时用水量，L/h；

T——建筑物的用水时间，h；

K_h——小时变化系数，为建筑物最高日最大时用水量和平均时用水量的比值，其比值大小反映了用水不均匀程度的大小。

各类建筑的生活用水定额、小时变化系数见相关设计手册。

3）消防用水量

消防用水量大而集中，与建筑物的性质、规模、耐火等级和火灾危险程度等密切相关。消防用水量应按现行的有关消防规范确定。

3.2.5 室内给水系统的加压和储存设备

城市供水管网的水压通常只能满足大多数低层、多层建筑的用水压力要求，其他用水压力高的，可以设置储水构筑物和增压设备解决。增压设备有水泵、高位水箱、气压装置等，储水构筑物通常有储水池。

1. 储水池

储水池是储存和调节水量的构筑物。储水池的有效容积与水源供水保证能力和用户要求有关，一般根据调节水量、消防储备水量和生产事故储备用水量确定。储水池的有效容积：

$$\begin{cases} V \geqslant (Q_b - Q_l) T_b + V_f + V_s \\ Q_l \mathrm{T}_t \geqslant T_b (Q_b - Q_l) \end{cases} \quad (3-4)$$

式中 V——储水池的有效容积，m^3；

Q_b——水泵出水量，m^3/h；

Q_l——储水池进水量，m^3/h；

T_b——水泵最长连续运行时间，h；

T_t——水泵运行间隔时间，h；

V_f——火灾延续时间内，室内外消防用水总量，m^3；

V_s——生产事故备用水量，m^3/h。

当资料不足时，储水池的调节水量 $T_b(Q_b-Q_l)$，不得小于建筑物日用量的8%～12%。如果储水池仅备生活(生产)调节水量，则水池有效容积可不计 V_f 和 V_s。

生活储水池位置应远离化粪池、厕所、厨房等卫生环境不良的房间，可设在室外靠近泵房处，也可设在地下室内，为防止生活用水被污染，水池溢流口底标高应高出室外地坪100mm，保持足够的空气隔断，保证在任何情况下污水不能通过入孔、溢流管等流入池内。储水池进、出水管的布置应使池内储水经常流动，防止滞流和死角，以免池水腐化变质。当储水池仅储存消防水量时，可兼作喷泉水池、水景池和游泳池(需有净水措施)。当生活(生产)、消防共用水池时，应在消防水位面上设有小孔，如图3.11所示，以确保消防储备水量不被动用，当水池包括室外消防水量时，应在室外设有供消防车取水用的取水口。

当室外管网能满足建筑物所需水量，但供水部门不允许水泵直接从室外管网抽水时，可设仅满足水泵吸水要求的吸水井，吸水井的有效容积不得小于最大一台水泵3min的出水量，且满足吸水管的布置、安装、检修和水泵通常工作的要求，其最小的尺寸如图3.12所示。

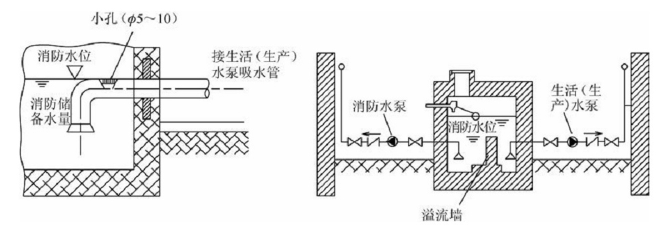


图 3.11 储水池中消防储水平时不被动用的措施

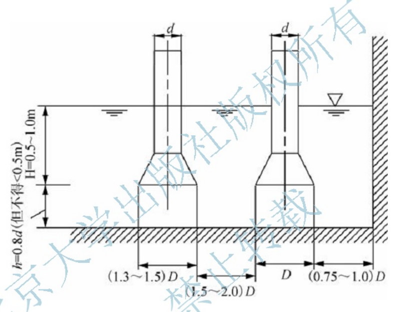


图 3.12 吸水管在吸池中布置的最小尺寸

2. 水泵

水泵是室内给水系统中主要的增压设备，一般多采用离心泵和管道泵。

离心泵有立式、卧式、单级、多级、单吸、双吸、自吸式等多种形式。其主要的工作原理是：离心是物体惯性的表现。比如雨伞上的水滴，当雨伞缓慢转动时，水滴会跟随雨伞转动，这是因为雨伞与水滴的摩擦力作为给水滴的向心力使然。但是如果雨伞转动加快，这个摩擦力不足以使水滴再做圆周运动，那么水滴将脱离雨伞向外缘运动。就像用一根绳子拉着石块做圆周运动，如果速度太快，绳子将会断开，石块将会飞出。这个就是所谓的离心作用。离心泵就是根据这个原理设计的：高速旋转的叶轮叶片带动水转动，将水甩出，从而达到输送的目的；而管道泵则是单吸单级离心泵的一种，属立式结构，因其进出口在同一直线上，且进出口口径相同，仿似一段管道，可安装在管道的任何位置，故取名为管道泵(又名增压泵)。管道泵结构特点：为单吸单级离心泵，进出口相同并在同一直线上，和轴中心线成直交，为立式泵。

水泵常设在建筑的底层或地下室内，这样可以减小建筑负荷、振动和噪声，且便于水

泵吸水。水泵的吸水方式有两种：①直接从室外管网上吸水，适用于外网供水量大，水泵直接吸水时不影响管网的工作情况。经供水部门同意，可以采用由外网上直接抽水，这种方式可充分利用外网的压力，系统简单，并能保证水质不受污染；②水池-水泵抽水方式，当外网不允许直接抽水时，可建造储水池，储备所需的水量，水泵从池中抽水，送入室内管网。储水池存储生活用水和消防用水，供水可靠，对外网无影响。高层民用建筑、大型公共建筑及由城市管网供水的工业区企业，一般采用此方式，但此方式的水池易受污染，需增加消毒设备。

1）水泵的流量

在生活(生产)给水系统中，当无水箱时，水泵流量需满足系统高峰用水要求，故其流量均应以系统最大瞬时流量即设计秒流量确定。当有水箱时，因水箱能起调节水量的作用，水泵流量可按最大时流量确定。若水箱容积较大，或用水量较均匀，则水泵流量可按平均时流量确定。生活、生产消防共用水泵，在消防时其流量除保证消防用水量外，还应保证生活、生产最大时流量。

2）水泵的扬程

(1）直接从配水管中吸水时，水泵所需总扬程，即

$$H_p \geqslant Z + H_1 + H_2 + H_3 - H_0 \quad (3-5)$$

式中 H_p——水泵所需总扬程，mH_2O；

Z——水泵的几何升水高度，即自连接引入管处给水管轴线至最不利配水点(或消火栓)间的垂直距离，m；

H_1——吸水管和压水管的总水头损失，mH_2O；

H_2——水表水头损失，mH_2O；

H_3——最不利配水点(消火栓或水箱最高设计水位)处所需的流出水头，mH_2O；

H_0——资用水头，即引入管连接点室外管网的最小压力，mH_2O。

(2）水泵从储水池抽水时，水泵所需总扬程，即

$$H_p \geqslant Z_1 + Z_2 + H_1 + H_3 \quad (3-6)$$

式中 Z_1——水泵吸水几何高度，即泵车至储水池供水面间的垂直距离，m；

Z_2——水泵压水几何高度，即泵轴至最不利配水点(消火栓或水箱最高设计水位)间的垂直距离，m。

水泵机组一般设置在水泵房内。水泵在工作时会产生振动：发出噪声，因此水泵房的位置应远离要求防震和安静的房间(如精密仪器室、病房、教室等)，必要时在相应位置上设隔振减噪装置。

3. 水箱

水箱设置在建筑物的屋顶上，起着存储水、调解用水量变化和稳定管网压力的作用。当室外管网内水压对多层建筑所需的压力呈经常周期性不足时，在用水低峰时，水箱从室外管网直接进水；而高峰水压不足时，由水箱供给水压不足的楼层用水。当室外管网压力经常不能满足建筑供水要求时，可以设置水泵和水箱联合供水系统，既可减小水箱容量，又可提高水泵运行效率，当高层、大型公共建筑中为确保用水安全或须储备一定的消防水量时，也需要设置水箱。水箱是一种有效的调节设备。但由于水箱需设置在屋顶的最高

处，容量也相当大，这样增加了建筑高度和结构荷载，有碍美观，不利于抗震。

常用的水箱做成圆形、方形和矩形。圆形水箱结构合理，节省材料，造价低廉，但平面布置不方便，占地较大。方形和矩形水箱布置方便，占地较小，但水箱结构较复杂，材料消耗量大，造价较高。

1）水箱材料

水箱材料有以下几种。

（1）金属材料。大小水箱均可使用，自重轻，施工安装方便；但易锈蚀，维护工作量较大，造价较高。一般采用碳素钢板焊接，水箱内外表面要进行防腐处理。

（2）钢筋混凝土材料。适用于大型水箱，经久耐用，维护简单，造价较低；但自重大，管道与水箱连接处处理不好容易漏水。

（3）其他材料。小容积和临时性水箱可用木材做；也可使用塑料、玻璃钢等材料制作水箱。水箱内有效水深，一般为0.7～2.5m。

2）水箱附件

水箱应设有进水管、出水管、溢流管、汇水管、信号管等，如图3.13所示。

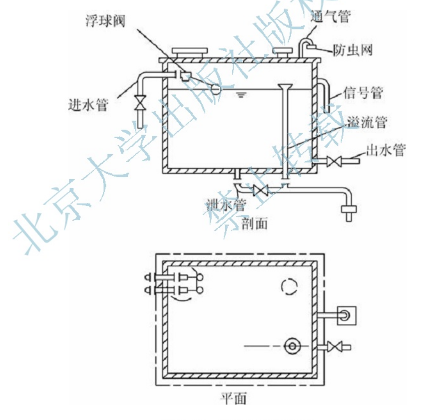


图3.13 水箱附件示意图

（1）进水管。水箱进水管一般要从侧壁接入；当水箱靠室内管网压力进水时，进水管出口应装浮球阀。浮球阀不少于两个，其中一个坏了，其余仍能工作。每个浮球阀前装有检修闸门。水箱由水泵供水，并利用水箱中水位自动控制。水泵运行时，不装浮球阀。

（2）出水管。出水管可从水箱侧壁或底部接出，进出水管合用时，出水管上安装止回阀，如图3.14所示。

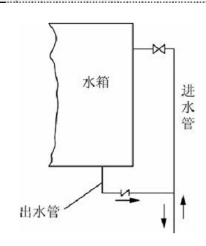


图 3.14　水箱进出水管接在同一条管道上示意图

（3）溢流管。溢流管从水箱侧壁接出。其直径比进水管大1～2号。溢流管上不得安装闸门，不能与排水系统直接连接，必须采用间接排水。溢流管上应有防止尘土、昆虫、蚊蝇等进入的措施，如设置水封、滤网。

（4）泄水管。水箱泄水管从水箱底部最低处接出。泄水管上装有闸门，并可与溢流管相接，但不得与排水系统直接连接。泄水管管径一般采用40～50mm。

（5）信号管。信号管与溢流管的溢流液面齐平，即水箱水位在溢流管还没有溢流时，信号管开始流水。管径采用15mm，接至经常有人值班房间的洗脸盆、洗涤槽处。

（6）通气管。设在饮用水箱的密封盖上，管上不应设阀门，管口应朝下，并设防止尘土、昆虫和蚊蝇进入的滤网，通气管径一般不小于50mm。

3）水箱的容积

水箱的有效容积应根据调节水量、生活和消防储备水量确定。其中调节水量应根据用水量和流入量的变化曲线确定，如无资料时，可估算。如水泵为自动启闭时，不得小于日用水量的5%；如水泵为人工启闭时，不得小于日用水量的12%；仅在夜间进入的水箱，生活用水储备量按用水人数和用水定额确定，一般按经验，水箱容积可取日用水量的50%。消防储备水量一般取10min的消防用量，为避免水箱容积过大，根据建筑防火规范规定：一类公共建筑不小于18m³；二类公共建筑和一类居住建筑不小于12m³，二类居住建筑不小于6m³。消防储水量在平时不得被动用。

4）水箱的设置高度

高位水箱的设置高度，应按最不利处的配水管所需水压计算确定。水箱底出水管安装标高：

$$Z_{箱}=Z_1+H_2+H_3 \tag{3-7}$$

式中　Z_1——最不利配水点标高，m；

H_2——水箱供水到最不利配水点计算管路总水头损失，mH_2O；

H_3——最不利配水点的流出水头，mH_2O。

对于储存有消防水的水箱，水箱安装高度难以满足顶部几层消防水压的要求时，需另行采取局部增压措施。

5）水箱的安装

水箱间在房屋内应处于便于管道布置、通风良好的位置。采光好，防蚊蝇。室内最低气温不得低于5℃，水箱的净高不得低于2.2m。

4. 气压给水设备

气压给水设备是给水系统中的一种利用密封储灌内空气可压缩性进行储存、调节和加压送水量的装置。其功能与水塔或高位水箱基本相似，罐的送水压力是压缩空气而不是位置高度，因此只要变更罐内空气压力，气压装置可设置在任何位置，如室内外、地下、地面或楼层中，应用较灵活方便，建设快，投资省，供水水质好，还有能消除水锤作用等优

点。但罐容量小，调节水量小，罐内水压变化大，水泵启闭频繁，故耗费电能多。

按输水压力稳定性可分为变压式和定压式两类。

（1）变压式气压给水设备在向给水系统送水过程中，水压处于变化状态，如图 3.15 所示。罐内水在压缩空气的起始压力下(即最大工作压力的作用下)被压送至给水管网，随着罐内水量减少，压缩空气体积膨胀，压力减小，当压力降至最小工作压力时，压力继电器动作，使水泵启动。水泵出水除供用户外，多余部分进入气压罐，罐内水位上升，空气又被压缩。当压力达到最大时，压力继电器动作，水泵停止工作，由气压水罐再次向管网输水。

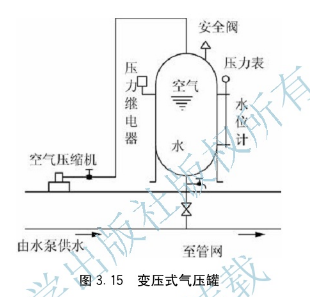


图 3.15　变压式气压罐

（2）定压式气压给水设备在向给水系统送水过程中，水压维持恒定，如图 3.16 所示。在气水同罐的单罐变压或气压给水设备的供水管上安装调压阀，或在气水分罐的双罐变压给水设备的压缩空气连通管上安装调节阀，分别控制阀出口端的水压或气压系统所需压力。

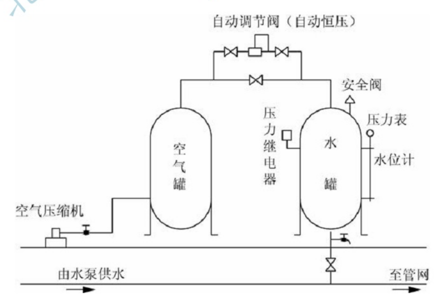


图 3.16　定压式气压罐

(3) 按气压水罐的形式可分为补气式给水设备和隔膜式气压给水设备。

3.2.6 高层建筑给水系统

高层建筑(Tall Building)是指10层及10层以上或房屋高度大于24m的建筑物。高层建筑的高度是指室外地面至主要屋面之间的距离，不包括地下部分。若高度超过100m，则称为超高层建筑。

由于高层建筑的层数多，采用一般的供水方式，则管道中的静水压力势必很大。静水压力大将导致一系列不良后果。如：管中的静水压力大于管道的承压能力(工作压力)而损坏管道，易产生水击造成管道振动和噪声，同时还会使出水产生喷射而使用不便。因此，有必要采取技术措施加以解决。这一解决方法就是进行竖向分区，即将高层建筑的给水管网竖向分为几个区域进行布置，使下层管道系统的静水压力减小。国产管道配件和卫生器具的工作压力一般为0.34～0.4MPa。因此，我国《建筑给水排水设计规范》规定高层建筑生活给水系统竖向分区：对住宅、旅馆、医院宜为300～350kPa；办公室宜为350～450kPa。

我国建筑给水系统竖向分区有多种方式，现将常用的几种方式简介如下。

1. 减压给水方式

如图3.17所示整个高层建筑的用水由设置在泵房内的水泵抽升到最高处水箱，再逐级向下一区的高位水箱给水，形成减压水箱串联给水系统。其优点是水泵管理简单(水泵仅两台，一用一备)，水泵及管路的投资较省，水泵占地面积小。其缺点是设置在最高层的水箱总容积大，增加了结构负荷，而且起传输作用的管道管径也将加大，水泵向高位水箱供水，然后逐渐减压供水，增加了中、低压区常年能耗，提高了运行成本，且不能保证供水的安全可靠，若上面任一区管道和水箱等设备出了问题便会影响下面的各区供水。

如图3.18所示减压给水的另一种方式，各区的减压水箱由减压阀代替。这种产品在国内已有生产，价格便宜，安装方便，使用可靠。这种给水方式提高了建筑面积利用率(无水箱)。

2. 并联给水方式

如图3.19所示，这种方式是将各供水区的水泵集中设于地下室，各水泵从储水池向各种供水区的水箱送水，再由各区的水箱向本区管网供水。这种给水方式比减压给水方式动力消耗小，可靠性高，水泵集中于底层，管理方便。其缺点是占地面积大、设备及管路复杂等。

高层建筑每区内的给水管网，根据供水的安全要求程度设计成竖向环网或水平向环网。在供水范围较大的情况下，水箱上可设置两条出水管接到环网。此外，在环网的分水节点处的适当位置设置阀门，以减少管段损坏或维修时停水影响的供水范围。

高层建筑给水同样可采用气压给水及变频供水等方式。

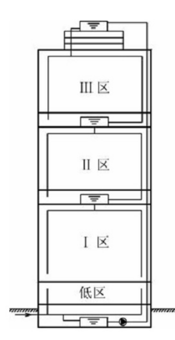


图 3.17 减压给水方式

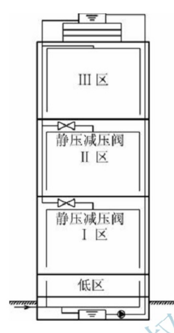


图 3.18 无减压水箱的减压给水方式

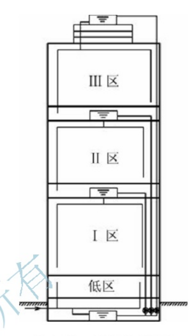


图 3.19 并联给水方式

知识链接

室内消防给水系统

对于建筑物中一般物质的火灾，利用室内消防给水设备是最经济有效的扑灭方法。火灾统计资料表明，设有室内消防给水设备的建筑物内，初起火灾，主要是用室内消防给水设备控制和扑灭的。

一般建筑物或厂房内，常常是消防给水与生产或生活给水组成的联合系统。只在建筑物防火要求高，不宜采用联合系统，或联合系统不经济或技术上不可能时，才采用单独的消防给水系统。

室内消防给水系统包括消火栓给水系统、自动喷淋灭火系统和水幕消防系统。消防系统应符合《建筑设计防火规范》(GB 50016—2006)和《自动喷水灭火系统施工及验收规范》(GB 50261—2005)。

建筑消防给水可按以下不同方法分类：

(1) 按我国目前消防登高设备的工作高度和消防车的供水能力分，如：低层建筑消防给水系统和高层建筑消防给水系统。

9 层及 9 层以下的住宅及建筑高度小于 24m 的低层民用建筑，室内消火栓系统主要是扑灭建筑物的初期火灾，后期火灾可依靠消防车扑救。对于高层建筑而言，因我国目前登高消防车的最大工作高度约为 24m，大多数通用消防车直接从室外消防管道或消防水池抽水的灭火高度也近似为 24m，不能满足高层建筑上部灭火要求，所以高层建筑消防给水系统要立足于自救，不但要扑救初期火灾，还应具有扑救大火的能力。

(2) 按消防给水系统的救火方式分，如：消火栓系统和自动喷水灭火系统等。

消火栓给水系统由水枪喷水灭火，系统简单，工程造价低，是我国目前各类建筑普遍采用的消防给水系统。自动喷水灭火系统由喷头喷水灭火，该系统自动喷水并发出报警信号，灭火、控火成功率高，是当今世界上广泛采用的固定灭火设施，但因工程造价高，目前我国主要用于建筑内消防要求高、火灾危险性大的场所。

(3) 按消防给水压力分，如：高压、临时高压和低压消防给水系统。

(4) 按消防给水系统的供水范围分，如：独立消防给水系统和区域集中消防给水系统。

对于消防给水的监控，按照我国现行的消防管理要求，由消防系统统一控制管理，不直接纳入到BAS中。

3.3 室内给水系统的控制

3.2节详述了室内给水系统运行的工艺流程知识，本节将分析BAS如何实现对建筑物内部给水系统的监控。

大多数智能建筑属于高层建筑，高层建筑必须采用加压供水的方式。因此，本节主要围绕这一形式的给水系统进行监控原理分析。

特别提示

消火栓泵、喷洒泵等消防给水设备的控制属消防联动控制系统的监控对象，按我国现行体制，不纳入BAS的监控范围。其他的如：水质处理装置及建筑中水、排水水处理装置等都有自身完整的控制系统，BAS对其的监控处理方法类似于对冷水机组、锅炉的处理方法，不去直接控制。

3.3.1 室内给水系统的BAS监控思路

1. 高位水箱给水系统的监控思路

城市管网的供水先进入蓄水池，然后由水泵将水提升到高位水箱，再从高位水箱靠重力向给水管网配水实现给用户供水。高位水箱给水系统用水是由水箱直接供应，供水压力比较稳定，且有水箱储水，供水较为安全。为保证供水的连续性，高位水箱中应始终有水，但应防止向水箱的供水过量而引起溢出。因此，水箱水位应控制在一定范围内。

BAS对高位水箱给水系统监控思想如下。

1）由高位水箱的水位决定水泵的启停

当水箱中水位达到高水位时，水泵停止向水箱供水；当水箱中的水被用到低水位时，水泵再次启动向高位水箱供水。为此，在水箱内应设置水位开关，向DDC传送DI信号。

2）对水泵的常规监控

主要有：DDC对水泵的启停控制(1DO)、运行状态(是否运行，1DI)的监测、故障报警(是否过载，1DI)的监测，点位共计2DI、1DO。此外，还可以对工作模式(手动/自动，1DI)进行监测。

3）地下蓄水池的水位监控

主要监控高低水位报警信号，以防止溢流和储水量过少。

2. 恒压给水系统的监控思路

高位水箱给水系统的优点是预储一定水量，供水直接可靠，尤其对消防系统是必要的。但水箱自重很大，会增加建筑物的负荷，占用建筑物面积且存在水源受二次污染的危险。因此有必要研究无水箱的水泵直接供水系统。

1）水泵变频调速供水介绍

早期的水泵直接供水系统，由于水泵的转速不能调节，水压随用水量的变化而急剧变化。当用水量很小时，水压很高，供水效率很低，既不节能，又使系统的水压不稳定。后来这种系统被采用自动控制的多台并联运行水泵所替代，这种系统能根据用水量的变化，开停不同水泵来满足用水的要求，以利节能。

随着计算机控制技术的迅速发展，变频调速装置得到了越来越广泛的应用。要实现水泵恒压供水，最理想的方式是采用计算机控制的水泵变频调速供水。变频调速供水方式由于减少了水箱储水环节，避免了水质的二次污染。泵组及控制设备集中设在泵房，占地面积小、安装快、投资省。采用闭环供水控制方式，根据管网压力信号调节水泵转速，实现变量供水。该方式水压稳定、全自动运行、可无人值守、可靠性高。变频调速供水方式中，水泵的转速随着管网压力的变化而变化。由于轴功率与转速的三次方成正比，因此与恒速泵运行方式相比，明显节省电能。另外，变频调速为无级调速，水泵的启动为软启动，减小了启动时对水泵及电网的冲击，且多台泵组采用“先投入，先退出”的运行方式，确保了每台泵的运行时间相同，能够有效延长泵组的使用寿命。变频调速闭环供水方式可以确保管网压力恒定，避免了水箱供水方式中可能产生的溢流或超压供水，减小了水能的损耗。

变频调速恒压供水既节能，又节约建筑面积，且供水水质好，具有明显的优点。但变频调速装置价格昂贵，而且必须有可靠的电源，否则停电即停水，给人们生活带来不便。

水泵变频调速供水与变风量空调系统的情形十分相似。系统控制的模式有两种：恒压变流量和变压变流量。恒压变流量的控制目标是保持管网入口处的水压为恒定值。变压变流量的控制目标是使给水管网最不利点的压力保持恒定，或者在管网入口处按运行时段分别设定水压。由于变压变流量模式更贴近管网的实际运行工况，因而运行效果更好。

变频供水设备多为成套产品，BAS 可以与其通信。

2）水泵的变频控制

在 BAS 给排水系统中对于水泵的控制经常提出要求采用变频控制，而现在变频控制器的技术已经非常成熟，产品成本也在不断下降，为变频控制在工程中的使用提供了条件。

（1）水泵采用变频控制的优势。

① 调节效率高，接近于理想的调节和变速，节能效果显著。

② 变频器提供了丰富的输入输出信号端子，利用这些端子，可方便地实现电机的启停、调速，再加上速度检测回路，形成闭环控制，很容易实现自动化控制。

③ 可容易地实现工频电网运行与变频器运行之间的切换，一旦变频器发生故障，可以退出运行改由工频电网直接运行，不影响水泵的连续运行。

④ 能同时实现软启动和软停车。

⑤ 易进行设备改造。改造设备时，不涉及电动机及所驱动的水泵本身，停机改造时间短。

⑥ 安装地点灵活，不限于电动机轴端或靠近处，处理方便。

（2）变频控制主回路方案。

① 方案 1。变频器直接控制。此方案适用于负载对可靠性运行要求不高的场所，若变

频器出现故障，则不能继续运行。

② 方案 2。变频器带直接启动旁路。此方案适用于负载对可靠性运行要求较高、且负载功率不大、可旁路直接启动的场所，若变频器出现故障，则可以手动切换到旁路，直接启动运行。

③ 方案 3。变频器带软启动旁路。此方案适用于负载对可靠性运行要求较高，且负载功率较大，旁路软启动的场所，若变频器出现故障，则可以手动切换到旁路，通过软启动器启动运行。

(3) 变频器的二次回路设计。

① 变频器的启动延迟问题。变频器在加电过程中，需经过一个加电自检的过程后，才能处于准备工作的状态。加电自检的过程通常需要 5～10s。在设计变频器的主回路和二次回路时，要求考虑此问题。

② 手动/自动状态转换。在要求进行自动控制水泵的二次控制回路中，通常会在控制柜面板设置手动/自动转换开关。在自动状态时，接受 BA 等系统的自动控制信号。

但在变频器的二次回路中。不宜如此设置。因为通用的变频器均自带就地/远程控制的转换按键，以实现手动/自动转换。否则，两组手动/自动转换开关，会导致控制复杂、混乱。

③ 变频柜的发热。变频柜通常发热量大，一般均需配置散热风扇。散热风扇回路建议增加保护熔断器，因为散热风扇连续运行时间长，使用寿命一般在一年左右，设置熔断器保护后，可避免散热风扇故障导致变频器停机。

④ 变频器的二次回路接线如图 3.20 所示。

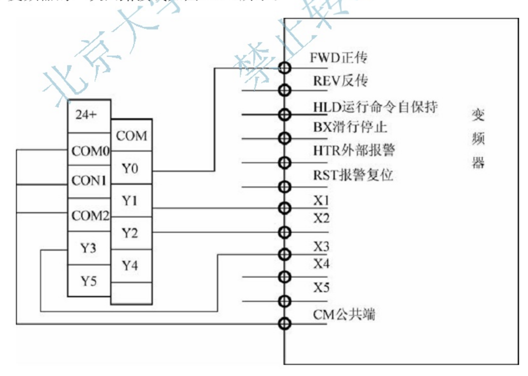
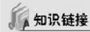


图 3.20 变频器的二次回路接线



水泵的变频节能原理

由流体力学可知，P(功率)$=Q$(流量)$\times H$(压力)，流量Q与转速N的一次方成正比，压力H与转速N的平方成正比，功率P与转速N的立方成正比，如果水泵的效率一定，当要求调节流量下降时，转速N可成比例地下降，而此时输出功率P成立方关系下降。即水泵电机的耗电功率与转速近似成立方比的关系。例如：一台水泵电机功率为55kW，当转速下降到原转速的4/5时，其耗电量为28.16kW，省电48.8%，当转速下降到原转速的1/2时，其耗电量为6.875kW，省电87.5%。

无功功率不但增加线损和设备的发热，更主要的是功率因数的降低导致电网有功功率的降低，大量的无功电能消耗在线路当中，设备使用效率低下，浪费严重。由公式$P=S\times \mathrm{COS}\Phi$，$Q=S\times \mathrm{SIN}\Phi$(其中，$S$为视在功率；$P$为有功功率；$Q$为无功功率，$\mathrm{COS}\Phi$为功率因数)，可知$\mathrm{COS}\Phi$越大，有功功率$P$越大，普通水泵电机的功率因数在0.6～0.7，使用变频调速装置后，由于变频器内部滤波电容的作用，$\mathrm{COS}\Phi\approx 1$，从而减少了无功损耗，增加了电网的有功功率。

此外，由于电机为直接启动或Y/D启动，启动电流等于4～7倍额定电流，这样会对机电设备和供电电网造成严重的冲击，而且还会对电网容量要求过高，启动时产生的大电流和振动时对挡板和阀门的损害极大，对设备、管路的使用寿命极为不利。而使用变频节能装置后，利用变频器的软启动功能将使启动电流从零开始，最大值也不超过额定电流，减轻了对电网的冲击和对供电容量的要求，延长了设备和阀门的使用寿命，节省了设备的维护费用。

3) 变频器介绍

变频器是应用变频技术与微电子技术，通过改变电机工作电源频率方式来控制交流电动机的电力控制设备。变频器主要由整流(交流变直流)、滤波、逆变(直流变交流)、制动单元、驱动单元、检测单元微处理单元等组成。通过改变电源的频率来达到改变电源电压的目的，根据电机的实际需要来提供其所需要的电源电压，进而达到节能、调速的目的，另外，变频器还有很多的保护功能，如过流、过压、过载保护等。随着工业自动化程度的不断提高，变频器也得到了越来越广泛的应用。

变频器外部线路的具体连线：变频器的控制面板下面是一排接线端子，我们所有对变频器的连线都是从这一排接线端子引出来的。但变频器的控制面板是不能频繁地拆卸的。所以为了保护变频器，也为了方便做试验，一般会将试验中需要用到的接线端子都连上线并且引出来。在试验中，大家只需要将这些引出的线按照要求做一下连接就可以了，如图3.20所示。

4) BAS对变频调速恒压供水系统的监控策略

如采用变频调速恒压供水系统，则水泵由变频恒压控制装置控制其运转。变频调速恒压供水设备多为成套产品，通常由控制器完成控制、监控、安全保护等功能，故BAS可以采取类似对冷水机组的处理方式，与其自带的控制系统实现通信，而一般不直接控制。

当然，还可以直接通过DDC实现BAS对水泵的变频调速控制。其控制过程是在水泵出水口干管上设压力传感器，实时采集管网压力信号，通过1路AI通道送入现场控制器，通过与设定水压值比较，按PID算法得出偏差量，控制电源频率变化，调节水泵的转速，从而达到恒压变量供水的目的。当系统用水量增加时，水压下降，DDC使变频器的输出频率提高，水泵的转速提高，供水量增大，维持系统水压基本不变；当系统用水量减少

时，过程相反，控制系统使水泵减速，仍维持系统水压。系统中设低水位控制器，其作用是当水池水位降至最低水位时(或消防水位时)，系统自动停机。如有多台水泵，均采用同一台变频调速器由可编程控制器实现多台泵的循环软启动。

3.3.2 典型给水系统的监控案例分析

图 3.1(a)是一典型的排水系统。本小节将以其作为 BAS 的监控对象，进行案例分析。图 3.2 是给水系统监控设计的一般思路和过程。其中，图 3.2(c)是 BA 监控设计的结果，详述如下。

1. 运行原理分析

设计前，先收集设计单位提供的给排水专业图纸、设计说明等资料。图 3.2(a)是给水系统的立面图，图 3.2(b)是给水系统图。该系统属于设有水泵、水箱的给水方式，它以城市管网作为水源，经引入管储存在原水池(蓄水池)中，然后经水泵加压后送至高位水箱，然后经配水管网给用户供水。蓄水池、高位水箱的液位应控制在一定的范围内，两台水泵可一用一备、自动轮换。

经分析可知，BAS 监控的给水系统设备有：给水泵、高位水箱、贮水池(蓄水池)等。因此，可以将图 3.2(b)进一步抽象，图 3.2(a)即为这一抽象简化的结果。图 3.2(a)是 BAS 监控分析设计的基础，也是后面 BAS 监控原理图绘制的基础。

2. 监控需求分析

根据业主的需求和相关标准，该给水系统的监控要求有如下功能。

(1) 水泵运行状态显示。

(2) 水流状态显示。

(3) 水泵启停控制。

(4) 水泵过载报警。

(5) 水箱高低液位显示及报警。

本系统的贮水池兼做消防用水池，故需留有一定的消防用水量，以保障消防用水。

3. 排水监控系统的监控策略分析

1) 给水泵启/停控制

给水泵的启/停由现场控制器检测水箱和贮水池的水位，经运算后发出控制命令实现自动控制。高位水箱设有水位开关，分别检测溢流水位、最低报警水位、下限水位和上限水位(LT1～LT4)；贮水池也设有水位开关，分别检测溢流水位、下限水位、最低报警水位和消防泵停泵水位(LT5～LT8)。屋顶高位水箱 4 路水位信号通过 DI 通道送入现场控制器，现场控制器通过 1 路 DO 通道控制水泵的启停：当高位水箱液位降低到下限水位时，DDC 发出启泵信号使给水泵运行，将水由低位水池提升到高位水箱；当高位水箱液位升高至上限水位或贮水池液位低到下限水位时，DDC 发出停止运行信号给水泵使之停止运行。将给水泵主电路上交流接触器的辅助触点作为开关量输入信号，接到 DDC 的 DI 输入通道上监测水泵运行状态；水泵主电路上热继电器的辅助触点信号(1 路 DI 信号)，提供电机水泵过载停机报警信号。当工作泵发生故障时，备用泵自动投入运行。

2）检测及报警

当高位水箱液位达到溢流水位，以及低位贮水池液位低至最低报警水位时，系统发出报警信号。贮水池的最低报警水位并不意味着贮水池无水。为了保障消防用水，贮水池必须留有一定的消防用水量。发生火灾时，消防泵启动，如果贮水池液面达到消防泵停泵水位，系统将报警。出水干管上设水流开关 FS，水流信号通过 DI 通道送入现场控制器，以监视供水系统的运行状况。

3）设备运行时间累计、用电量累计

累计运行时间为定时维修提供依据，并根据每台泵的运行时间，自动确定是作为运行泵还是备用泵。

4. BA 点位的确定

总结以上的分析，DDC 对该给水系统中的高位水箱、贮水池和 2 台给水泵进行了监控，合计：13DI、2DO。

DDC 对每个水泵有 1DO、3DI 点位：DDC 占用一个 DO 通道控制水泵的启停；DDC 的 1 个 DI 检测水泵的运行状态(是不是在运行)；DDC 的另 1 个 DI 检测水泵电机的故障状态(是不是正常运行，即过载报警信号)；此外还设 1 个 DI 检测手/自动状态。

DDC 对每个水位开关需有 1 个 DI 点位。高位水箱有 4 个水位开关，贮水池也有 4 个水位开关。故 DDC 对高位水箱和贮水池的 8 个液位(LT1～ LT2)的监测共需点位 8DI。

DDC 对水流开关 FS 的监测需占有 1DI。

5. 绘制 BA 监控原理图

典型给水系统的 BA 监控原理图如图 3.21 所示。

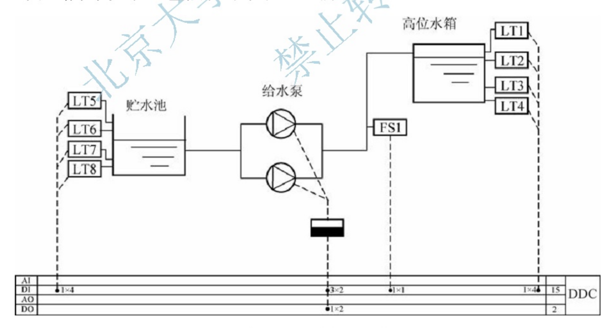


图 3.21 典型给水系统的 BA 监控原理图

至此，对给水系统的 BA 监控设计这一基础工作基本结束。之后的工作如：设备选型、设计方案的撰写、施工平面图的绘制、深化设计等，本书不做一一展开。下面将就 BA 受控设备控制箱二次回路进行分析。

3.3.3 二次接线图设计

水泵作为BAS的受控设备是通过控制箱与DDC的输入输出接口实现通信的，控制箱二次接线图表达了这一连接的方法，如图3.22所示。

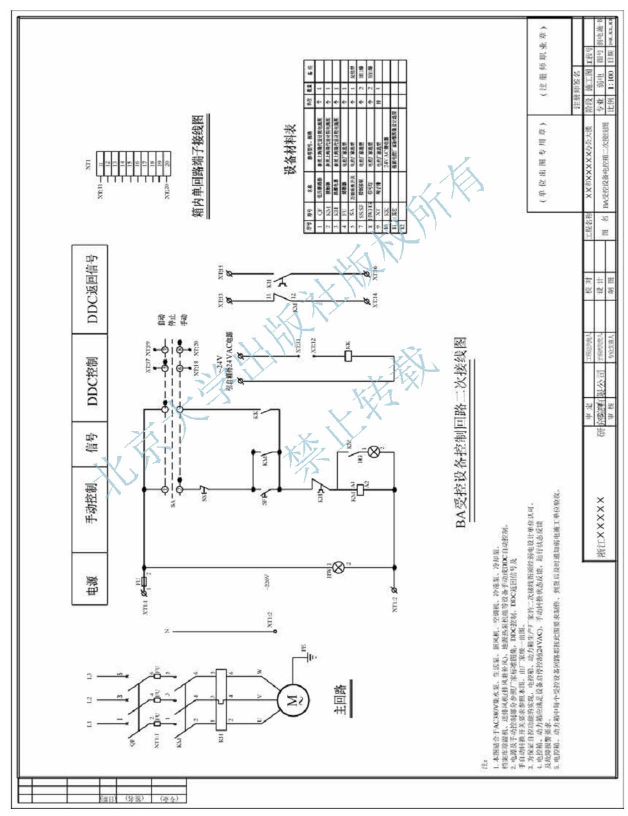


图3.22 BA受控设备控制回路二次接线图

1. DDC 对水泵的监控点位

DDC 对水泵的监控点位有 1DO、3DI，即：DDC 通过 1 路 DO 通道实现对水泵的启停控制，通过 1 路 DI 通道实现对水泵运行状态的监测，通过 1 路 DI 通道实现对水泵故障状态的监测，通过另 1 路 DI 通道实现对水泵的手/自动状态监测。

2. 万能转换开关对手动、自动、停止三档控制形式的选择

图中的万能转换开关实现手动、自动、停止三档的选择。当万能转换开关转向“手动”档时，则水泵的控制电路是一般的电气控制电路。此时水泵不受 BAS 控制，而需通过手动按钮 SF 和 SS 实现对水泵的启动和停止操作。当万能转换开关转向“自动”档时，则水泵受 BAS 监控，而手动按钮 SS、SF 的操作无效。当万能转换开关转向“停止”档时，则手动操作和 BAS 对水泵都不能控制。

下面就万能转换开关在“自动”档时 BAS 对水泵的监控进行分析。

3. 二次接线图的“DDC 控制”部分

XT：11、XT：12 端子是中间继电器 KK 线圈回路上引出的接线端子，与 DDC 的一路 DO 端口相接，供 DDC 用作传输控制命令以控制水泵的启停。当 DDC 发出启动命令后，XT：11、XT：12 接通，中间继电器 KK 的线圈得电，KK 的常开触点闭合，使得交流接触器 KM 得电，则水泵的主回路和控制回路上的 KM 触点动作，水泵运行，运行指示灯亮。当 DDC 发出停止命令后，XT：11、XT：12 断开，中间继电器 KK 的线圈失电，KK 的常开触点重新断开，使得交流接触器 KM 失电，则水泵的主回路和控制回路上的 KM 触点动作，水泵停止运行，运行指示灯不亮。

4. 二次接线图的“DDC 返回信号”部分

XT：13、XT：14 是水泵主电路交流接触器上一个单独的辅助触点上引出的接线端子，与 DDC 的一路 DI 端口相接，供 DDC 监测水泵的运行状态。该路 DI 信号是一个无源信号。当水泵正常运行时，则 KM 上的这一常闭触点必然断开；当水泵停止时，则该触点恢复常态，闭合。DDC 以此来判断水泵的运行状态。

XT：15、XT：16 是水泵主电路上热继电器 KH 的一个独立的辅助触点上引出的接线端子，与 DDC 的另一路 DI 端口相接，供 DDC 监测水泵的故障状态。该路 DI 信号是一个无源信号。当水泵正常运行时，则 KH 上的这一常开触点保持常态(断开的)；当水泵过载时，则热继电器动作，该触点闭合。DDC 以此来判断水泵的故障状态。

3.4 室内排水系统工艺流程认知

室内排水系统的任务是将室内卫生设备产生的生活污水、工业区废水及屋面的雨、雪水收集起来，有组织地及时通畅地排至室外排水管网、处理构筑物或水体，并能保持系统气压稳定，同时将管道系统内有害有毒气体排到一定空间而保证室内环境卫生。

3.4.1 室内排水系统的分类

按系统排除的污、废水种类的不同，可将室内排水系统分为生活污(废)水排水系统、

生产污水排水系统、生产废水排水系统、屋面雨水排水系统。

(1) 生活污(废)水排水系统用来排除日常生活中冲洗便器、盥洗、洗涤和淋浴等产生的污(废)水。

(2) 生产污水排水系统用来排除生产过程中被污染较重的工业废水的排水系统。生产污水需经过处理后才允许回收或排放，如含酚污水，酸、碱污水等。

(3) 生产废水排水系统用来排除生产过程中只有轻度污染或水温较高，只需经过简单处理即可循环或重复使用的较洁净的工业废水的排水系统，如冷却废水、洗涤废水等。

(4) 屋面雨水排水系统用来排除降落在屋面的雨、雪水的排水系统。

上述污、废水排除系统分合流制和分流制两种排水体制。合流制是所有污水都用一套排水系统排除的排水方式；分流制是用两套或两套以上的排水系统将污水分开排放的排水方式。排水体制的选择应根据地区情况，经技术、经济比较再行确定。

3.4.2 室内排水系统的组成

一个完整的排水系统由以下各部分组成，如图 3.23 所示。

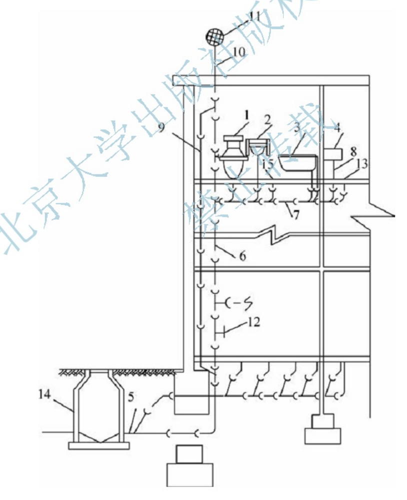


图 3.23 室内排水系统的组成

1—大便器；2—洗脸盆；3—浴盆；4—洗涤盆；5—排出管；
6—立管；7—横支管；8—支管；9—专用通气立管；10—伸顶通气立管；
11—网罩型通气帽；12—检查口；13—清扫口；14—检查井；15—地漏

1. 卫生器具和生产设备受水器

卫生器具是建筑内部用以满足人们日常生活或生产过程的各种卫生要求，收集并排出污、废水的设备，如洗涤盆、浴盆、盥洗槽等。

2. 排水管道

排水管道包括器具排水管(连接卫生器具与横支管之间的短管)、横支管(收集各卫生器具排水管流来的污水输送到排出管，应具有一定的坡度)、立管(收集各横支管，输送至排出管)、埋地干管和排出管。

3. 通气管道

排水系统内是水气两相流动，当卫生器具排水时，需向排水管道内补给空气，以使管道内部气压平衡，防止卫生器具存水弯水封被破坏，使水流畅通，同时将管道内的有毒有害气体排入大气中去，减轻金属管道的腐蚀。

4. 清通设备

由于排水系统中杂质、杂物较多，为疏通排水管道，保证水流畅通，需在立管上设检查口、在横管上设清扫口、带清扫门的90°弯头或三通、室内埋地横干管上的检查井等。

5. 局部提升设备

在民用与公共建筑的地下室、人防工程、地下铁道等地下建筑物的污废水不能自流排到室外时，常须设污水提升设备，如污水泵、空气扬水器等。

6. 污水局部处理构筑物

当建筑内污水未经处理不允许排入市政排水管网和水体时，须设污水局部处理构筑物，如化粪池、隔油池等。

7. 辅助设备

如地漏(汇集地面的积水)、水封(用于防止排水管道中的臭气和其他有害、易燃气体及虫类通过卫生器具泄水口进入室内造成危害，在卫生设备的排水口处或器具本身设置水封装置，常用的是管式存水弯)。

3.4.3 屋面雨水排除系统

屋面雨水排除系统的主要任务是收集屋面的雨水或融化的雪水，并将其有组织有系统地排至室外的雨水管道，避免雨(雪)水使屋面积水或四处溢流，造成屋面漏水、墙体受损等，影响人们的正常生活和生产活动。屋面雨水系统按雨水管道布置位置主要可分为外排水系统和内排水系统。

1. 外排水系统

外排水系统是指屋面不设雨水斗，建筑内部没有雨水管道的雨水排放系统。按屋面有无沟又可分为檐沟外排水系统和天沟外排水系统。檐沟外排水系统又称普通外排水系统或水落管外排水系统。

2. 内排水系统

内排水系统是指屋面设有雨水斗，建筑物内部设有雨水管道的雨水排水系统。

3.4.4 高层建筑室内排水系统

高层建筑的排水要求一定要排水畅通和良好的排气，为此在设计、安装、管材选用方面都有一些特殊要求。

1. 高层建筑的排水形式

建筑物内部生活污水，按其污染性质可分为两种：一种是粪便污水；另一种为盥洗、洗涤污水。这两种污水可分流或合流排出。近年来，为了节约用水，有的建筑物把洗涤污水进行中水处理作为冲洗粪便用水。这样，为综合利用水资源创造条件，高层建筑生活污水可采用分流排水系统。

2. 高层建筑排水方式

高层建筑排水立管长、排水量大，立管内气压波动大。在高层建筑中，自虹吸作用会破坏存水弯水封，因此一般应设通气管。通气管的作用是，使排水系统的管内压力平衡，避免自虹吸现象产生；还能使排水畅流并排泄掉下水道中所产生的有害气体。排水系统功能的好坏很大程度上取决于排水管道通气系统是否合理，这也是高层建筑排水系统的特点之一。

1）设通气管的排水系统

当层数在 10 层及 10 层以上且承担的设计排水流量超过排水立管允许负荷时，应设置专用通气立管。如图 3.24 所示，排水立管与专用通气立管每隔两层用斜三通相连接。图 3.24(a)为合流排放专用通气立管。当两根立管共用一根专用通气立管时，如图 3.24(b)所示，专用通气立管管径应与排水立管管径相同。

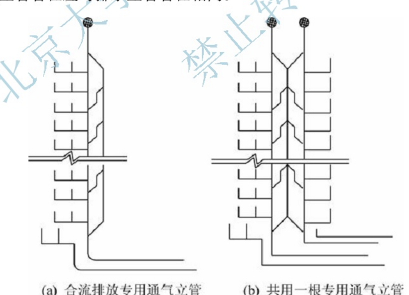


图 3.24 专用通气立管系统

对于使用要求较高的建筑和高层公共建筑，在主通气立管之外还可设置环形通气管、副通气立管，如图 3.25(a)、(b)。对卫生、噪声要求较高的建筑物内，生活污水管道宜设器具通气管，如图 3.25(c)所示。

2）苏维脱排水系统

设通气管的排水系统的排水性能虽好，但造价较高，占地面积大，管道安装复杂。如图 3.26(a)所示为苏维脱排水系统，它能省去通气立管和通气支管，具有较高的经济价值。苏维脱排水系统有两个特殊部件：气水混合器和气水分离器。其方式是，各层排水横支管与立管的连接采用气水混合接头配件[即气水混合器，如图 3.26(b)所示]；在排水立管基部设置气体分离接头配件[即气水分离器，如图 3.26(c)]。

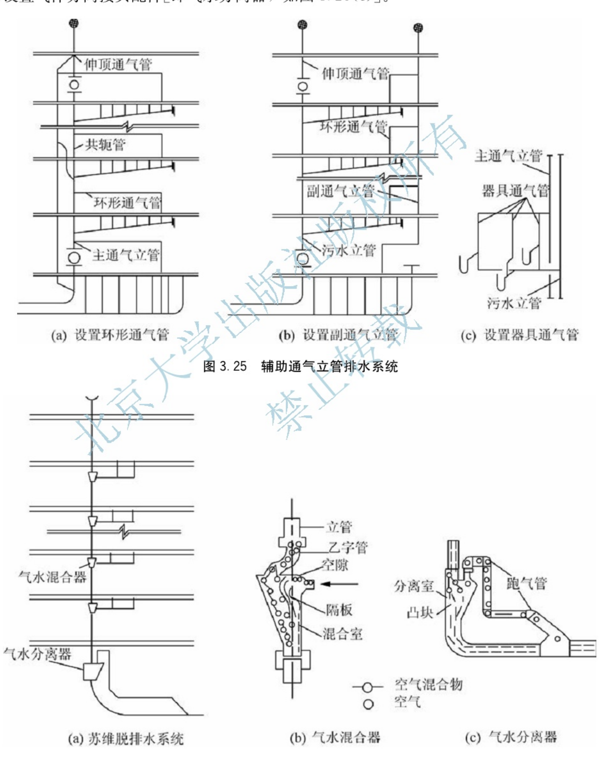


图 3.25　辅助通气立管排水系统

图 3.26　苏维脱排水系统

苏维脱排水系统有减少立管气压波动，保证排水系统正常使用、施工方便、工程造价低等优点。由于效果好，经济效益显著，已被广泛应用。

3）空气芯水膜旋流排水立管系统

空气芯水膜旋流排水立管系统广泛用于10层以上的建筑物，如图3.27所示。这种排水系统包括两个特殊的配件。

（1）用于连接立管与各楼层横支管的旋流连接配件，如图3.27(b)所示。接头中的固定式叶片，能使立管中下落的水流或横支管中流入的水流，沿管壁旋转而下，使立管从上至下形成一条空气芯，由于空气芯的存在，使立管内的压力变化很小，从而避免了水封被破坏，提高了立管的排水能力。

（2）用于连接立管底部与排水横干管的特殊排水弯头，如图3.27(c)所示。弯头有一特殊叶片装在立管的“凸管”一侧，迫使下落水流溅向对壁，并沿着弯头后方流下，这就避免了在横干管内发生水塞现象而封闭住立管内的气流，造成过大的正压，从而有效地保护了水封装置。

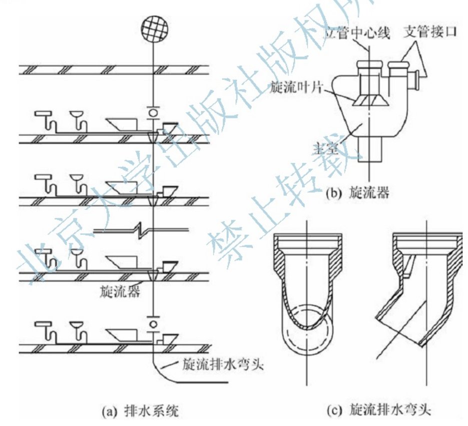


图3.27 空气芯水膜旋流排水系统

3. 高层建筑排水管材

高层建筑的排水立管高度大、管中流速大、冲刷能力强，应采用比普通排水铸铁管强度高的管材。对高度很大的排水立管应考虑采取消能措施，通常在立管上每隔一定的距离装设一个乙字弯管。由于高层建筑层间位变较大，立管接口应采用弹性较好的柔性材料连接，以适应变形要求。

3.5 室内排水系统的控制

高层建筑物一般都建有地下室，有的深入地面下 2～3 层或更深，地下室的污水一般不能以重力排除。在此情况下，污水集中收集于集水坑，然后用排水泵将污水提升至室外排水管中。

BAS 对排水系统的监控主要是对污水坑(池)、集水坑(井)、排水泵的监控。当坑中水位达到上限时，排水泵/潜污泵启动排水，水位下降至下限时，排水泵/潜污泵停止工作。泵启动的触发信号是上限水位。坑中应设置水位传感器。除此之外，对排水泵/潜污泵应有其他常规监控。

排水泵一般为非变频泵，其监控内容包括：水泵启/停控制及状态监视；水泵故障报警监视；水泵的手/自动控制状态监视等。目前，许多工程中潜水泵的启停控制由水泵生产厂商通过与液位开关联动自行实现，在此情况下楼宇自控系统只需对其运行及故障状态进行监视即可。

下面以图 3.1(b)为监控对象进行排水系统监控原理分析。BA 监控设计的结果如图 3.28 所示。

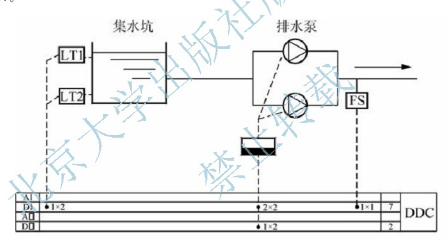


图 3.28 典型排水系统的 BA 监控原理图

3.5.1 运行原理分析

根据业主和设计单位提供的给排水专业图纸等资料，经理解分析，将排水系统抽象简化为 BA 监控分析设计基础的排水系统运行原理图。图 3.1(b)即为这一抽象简化的结果。

图 3.1(b)中所示，有两台排水泵。生活污水的排水量一般可以大致预测，若排水量不大，可以设置为一台排水泵控制；若排水量比较大，可以设置为两台排水泵控制。该系统采用排水泵控制，其工作可靠性高，当排水量不是很大时，可以一用一备，工作出现故障，备用泵自动介入，转为工作泵；也可以两台排水泵互为备用，轮流使用工作；当排水量过大时，两台水泵能够同时运行，以加快排水。

3.5.2 监控需求分析

根据业主和相关标准，该排水系统的监控要求有以下功能。

（1）水泵运行及状态显示。

（2）水泵启停控制。

（3）集水坑高低液位显示及报警。

（4）水泵过载报警。

3.5.3 排水监控系统的监控策略分析

1. 启停控制

集水坑设液位计监测液面位置，水位信号通过 DI 通道送入现场 DDC，当水位达到高水位时，DDC 启动排水泵运行，直到水位降至低水位时停止排水泵运行。

将水泵主电路上交流接触器的辅助触点作为开关量输入信号，接到 DDC 的 DI 输入通道上监测水泵运行状态；水泵主电路上热继电器的辅助触点信号通过 1 路 DI 通道，提供水泵电机过载停机报警信号。

2. 设备运行时间累计、用电量累计

累计运行时间为定时维修提供依据，并根据每台泵的运行时间自动确定是作为工作泵或是备用泵。

3.5.4 BA 点位的确定

总结以上的分析，DDC 对该排水系统中的集水坑和 2 台水泵进行了监控，共有 7DI、2DO。

（1）DDC 对集水坑的监控有 2 个 DI 点位，分别来自高位水位开关 LT1 和低位水位开关 LT2。

（2）DDC 对每个水泵的监控有 1DO、3DI 点位：DDC 的 DO 端发出控制命令以启停水泵；DDC 的 1 个 DI 检测水泵的运行状态；DDC 的另 1 个 DI 检测水泵电机的过载报警信号；DDC 还有 1 个 DI 检测水泵的手/自动状态。

（3）DDC 对水流开关 FS 有 1 个 DI 点。

3.5.5 绘制 BA 监控原理图

典型排水系统的 BA 监控原理图如图 3.28 所示。

特别提示

排水系统的 BA 受控设备二次接线图设计与给水系统类似，在此不再赘述。

3.6 室内热水供应系统的运行原理及其控制

在宾馆、医院等大型公共建筑和高层建筑中应设置热水供应系统，以供人们使用。室内热水供应系统是指对水进行加热、存储和输配的系统总称，其主要任务是按设计要求的水量、水温和水质随时向用户供应热水。热水制备的方式很多：有由换热设备、管道、水泵等组成的；有靠电能或煤、油等作为热源动力的；也有靠天然资源(太阳能)转换为热能的，形式繁多。热水的输送依靠热水泵完成。

3.6.1 室内热水供应系统的分类及组成

室内热水供应系统，按其供应范围大小可分为以下几种。

1. *局部热水供应系统*

局部热水供应系统是利用各种小型加热器在用水点将水就地加热，供给一个或几个用水点使用，如用小型电热水器、小型燃气热水器、太阳能热水器等给单个浴室、厨房等供应热水。该系统具有系统简单、维护管理方便灵活等优点，但热效率低、热水制备成本高。

2. *集中热水供应系统*

该系统由热源、热媒管网、热水输配管网、循环水管网、热水贮存水箱、循环水泵、加热设备及配水附件等组成，如图 3.29 所示。

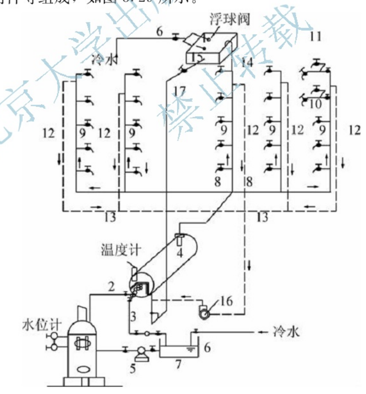


图 3.29 集中热水供应系统组成示意图

1—锅炉；2—热媒上升管；3—热媒下降管；4—水加热器；5—给水泵(凝结水泵)；6—给水管；7—给水箱(凝结水箱)；8—配水干管；9—配水立管；10—配水支管；11—配水龙头；12—回水立管；13—回水干管；14—膨胀管；15—高位水箱；16—循环水泵；17—加热器给水管

锅炉产生的蒸汽经热媒管送入水加热器把冷水加热，凝结水回凝结水池，再由凝结水泵送入锅炉加热成蒸汽。由冷水箱向水加热器供水，加热器中的热水由配水管送到各用水点。

为保证热水温度，热水可在配水管和循环管之间流动，用来补偿配水管的热损失。集中热水供应系统具有设备布置集中、便于集中管理、加热效率高、热水制备成本低、占地面积小等优点，但该系统结构复杂、投资较大。集中热水供应系统适用于高级宾馆、医院等公共建筑。

3. 区域热水供应系统

这种系统多使用热电厂、区域锅炉房所引出的热力管网输送加热冷水的热媒，可以向建筑群供应热水。

3.6.2 热水加热的方法

根据加热的方式不同，可分为直接加热和间接加热两种形式，如图 3.30 所示。

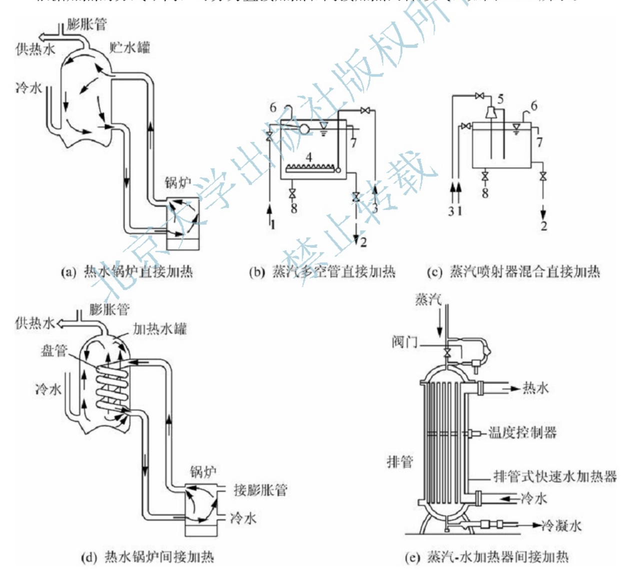


图 3.30 热水加热的方式

1—给水；2—热水；3—蒸汽 4—多孔管；5—喷射器；6—通气管；7—溢水管；8—泄水管

1. 直接加热

直接加热也称一次换热方式，该方式是利用燃气、燃油、燃煤作为燃料的热水锅炉把冷水直接加热到所需温度，或者是将蒸汽或高温水通过穿孔管或喷射管直接与冷水接触混合制备热水。这种加热方式多用于单层建筑的小型浴室或用水量集中、对热媒质量和噪声要求不严格的用户，它具有加热迅速、设备简单、热效率高、操作方便、易于管理维护等优点，但该方式噪声大、凝结水不能回收，对热媒质量要求高，不允许造成水质污染。

2. 间接加热

间接加热方式也称二次换热方式，是利用热媒通过热交换设备把热量传递给冷水，把冷水加热到所需热水温度，而热媒在整个加热过程中与被加热水不直接接触。这种加热方式噪声小，被加热水不会造成污染，运行安全稳定，适用于要求供水安全稳定，噪声低的高级宾馆、住宅、医院、办公楼等建筑。

3.6.3 室内热水供应系统的控制

热水的制备由水加热器完成，工程上广泛采用容积式热交换器，内有加热盘管，通常采用蒸汽作为热媒。热水出口温度一般控制在55～60℃。运行时应根据热水出口温度的实测值与设定值的偏差调节进入加热器的蒸汽流量，采用闭环的PI调节即可达到较好的调节效果。下面以BAS对热交换器的监控为例做一详述。

冬季，供应加热器的热水可通过热交换系统获得，如图3.31所示热交换系统监控原理图。

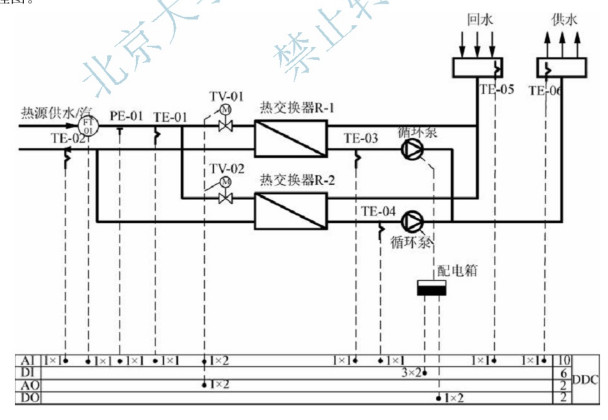


图3.31 热交换系统监控原理图

(1) 二次热水出口温度控制。由温度传感器 TE-03、TE-04 检测二次热水出口温度，送入 DDC，与设定值比较得到偏差，运用 PI 控制算法进行调节，DDC 输出相应信号，去控制热交换器上一次热水/蒸汽电动调节阀 TV-01、TV-02 的阀门开度，调节一次热水/蒸汽流量，使二次热水出口温度控制在设定范围内，从而保证空调采暖温度。

(2) 热水循环泵控制及联锁。热水循环泵的启/停由 DDC 控制，并随时监测其运行状态及故障情况。当热水循环泵停止运行时，一次测热水/蒸汽电动调节阀自动完全关闭。

(3) 工作状态显示与打印。包括二次热水出口温度，热水泵启/停状态、故障显示，一次热水/蒸汽进、出口温度、压力、流量，二次热水供回水温度等。

本章小结

本章以建筑给排水系统设备的 BAS 监控原理图设计为中心内容，分别论述了室内给水系统、室内排水系统、热水供应系统的基本知识，BAS 对它们的监控策略和监控原理图，二次接线图设计。给排水系统的运行原理知识是建筑设备自动化系统对给排水系统进行点位设计的基础。监控原理图是 BAS 点位设计的结果。二次接线图是深化设计的重要工作之一，该知识点有助于深入理解 BAS 对受控设备监控的原理。

习　题

一、填空题

1. 室内给水系统按水的用途分可分为三类：__________、__________和__________。

2. 按系统排除的污、废水种类的不同，室内排水系统分为__________、__________、__________和__________。

3. 高层建筑排水方式有：__________、__________和__________。

4. 室内热水供应系统按其供应范围大小可分为：__________、__________和__________。

5. 热水供应系统根据热水加热的方式不同，可分为__________和__________两种形式。

6. 间接加热方式也称二次换热方式，是利用热媒通过__________把热量传递给冷水，把冷水加热到所需热水温度，而热媒在整个加热过程中与被加热水不直接接触。

二、简答题

1. 建筑给排水工程的任务是什么？建筑给排水的工程范围包括哪些内容？

2. BAS 对建筑中水、排水水处理装置和消防给水设备，一般采取怎样的措施？

3. 对比分析生活给水系统、生产给水系统和消防给水系统在水质、水量、水压三个方面的要求。

4. 室内给水系统的组成主要有哪些？

5. 列举常用的加压和贮水设备。

6. 在初步设计时，给水系统所需的压力可怎样估算确定？

7. 现有一幢6层楼的住宅建筑，试估算其给水系统所需的压力。

8. 比较室内给水系统的给水方式一节中所述的7种给水方式的优缺点和应用场合。

9. 用AutoCAD绘制3.2.3节"室内给水系统的给水方式"中的7种给水方式的示意图。

10. 水泵、高位水箱、气压装置、储水池在给水系统中有什么作用？

11. 利用"baidu"、"google"等搜索引擎查阅网络资料，列举全球最高的10幢高层建筑。

12. 叙述高层建筑的给水系统进行竖向分区的原因。

13. 简述水泵变频调速供水的工作原理。

14. 简述水泵变频控制的优势。

15. 什么是变频器的二次回路设计？

16. 如何通过DDC实现对水泵的变频调速控制？

17. 对于典型的给水系统监控一般需要设置哪些监控点？

18. 简述电动机的二次接线图设计。

19. BAS对水泵是怎样进行监控的？

20. 高层建筑采用变频调速恒压供水系统有什么优点？

21. 利用AutoCAD绘制"典型给水系统的BA监控原理图"。

22. 叙述BAS对变频调速恒压供水系统的监控策略。

23. 水位开关在BAS对给排水系统的监控中有什么作用？

24. 某工程的给水系统监控要求如下，根据如图3.32所示请完成其监控原理图的绘制。

监控要求：(1)水箱的液位有三个：溢流液位、启泵液位、停泵液位。当液位低于启泵液位时，由控制器给出水泵的启动信号，当液位高于停泵液位时，由控制器给出水泵的停止信号；当液位高于溢流液位时，控制系统发出报警信号。(2)水池的液位有三个：溢流液位、启泵液位、停泵液位。当液位高于启泵液位时，由控制器给出水泵的启动信号；当液位低于停泵液位时，由控制器给出水泵的停止信号；当液位高于溢流液位时，控制系统发出报警信号。(3)水泵控制和监测为：运行状态，故障状态，手/自动状态反馈以及启停控制。

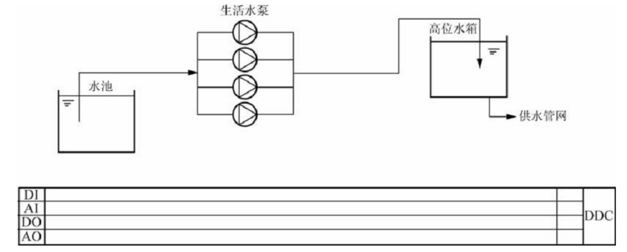


图3.32 给水系统监控原理图的绘制

25. 用 AutoCAD 绘制图 3.22“BA 受控设备控制回路二次接线图”。

26. 参照 3.3.3 节“二次接线图设计”中的案例，以图 3.21“典型给水系统的 BA 监控原理图”中的两台水泵作为 BAS 的受控设备，进行控制箱的二次接线图设计。

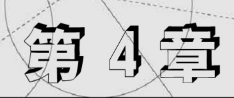
27. 简述室内排水系统的组成。

28. 简述地漏和水封的作用。

29. 分析典型排水系统的 BAS 监控原理。

30. 利用 AutoCAD 绘制典型排水系统的 BA 监控原理图。

31. 分析热交换系统监控原理，并利用 AutoCAD 绘制该图。



第4章 空调系统的控制

教学目标

通过学习了解暖通空调系统工艺流程的基本知识，具有看懂空调专业技术资料的能力。通过空气调节系统监控案例的学习，理解半集中式和集中式空调系统的控制原理，掌握相应的BAS点位设计的基本能力，具备监控原理图绘制、点位统计表编制和BAS设备配置的能力。

教学步骤

能力目标	知识要点	权重	自测分数
了解暖通空调系统工艺流程的基本知识	暖通空调监控在BAS中的重要性	3%	
	空气调节的任务与被控参数	3%	
	空调的热、湿负荷	5%	
	空调系统的组成与分类	7%	
	常用的空气处理设备	7%	
理解半集中式空气调节系统的控制原理，掌握相应的监控点位设计和监控原理图的绘制	半集中式空气调节系统的基本知识	5%	
	新风机组的控制	15%	
	风机盘管系统的控制	10%	

续表

能 力 目 标	知 识 要 点	权重	自测分数
理解集中式空调系统的控制原理，掌握相应的监控点位设计和监控原理图的绘制	集中式空调系统的基本知识	7%	
	全空气处理系统的监控功能	3%	
	定风量空调系统的控制	15%	
	变风量空调系统的控制	15%	
	送排风系统的控制	5%	

▶▶章节导读

前面几章对BAS做了整体的介绍。从本章开始，将介绍BAS对智能建筑中的机电设备的控制。暖通空调系统是BAS最主要的控制内容，其监控点数量通常占全楼BAS监控点总数的50%以上。因此，对暖通空调系统的监控占有十分重要的地位。

要实现BAS对空调系统设备的控制管理，需要具备空气调节和自动控制两方面的知识。只有了解作为受控对象的空调系统的工艺流程和特性要求，才能采用恰当的控制策略和技术措施，实现和发挥BAS应有的功能和作用。

暖通空调系统可以使室内环境的温度、湿度、气流组织以及室内空气品质等参数维持在期望的范围内，从而为人们的工作和生活创造了一个舒适和健康的建筑环境。影响热舒适性的因素有如下几种：空气温度、空气流速、相对湿度、辐射环境以及人员活动水平。通过BAS对空气调节系统的基本控制，可以达到热舒适性和最基本健康需求。暖通空调系统优化控制的目的在于以最小的能源代价获取令人满意的热舒适性和室内空气品质。

暖通空调系统包括冷热源、冷热媒输送设备(空调水系统)、空气处理机组、空气输送及分配设备等组成。本章只涉及空气侧系统的内容，冷热源和空调水系统的控制将在下一章介绍。本章只介绍空气侧系统设备的控制，而有关冷热源和空调水系统设备的控制将在下一章中介绍。

本章将围绕室内空气环境的控制，介绍了受控对象——空调系统的工艺流程和工作原理，分析了风机盘管加新风机组这种典型的半集中式空调系统的控制原理，分析了集中式空调系统中定风量(CAV)和变风量(VAV)系统的控制、空气处理机组(AHU)和变风量末端装置(VAV BOX)的控制等内容。



引例

在开利的网站上有这样一段话：“任何经历过炎炎夏日的人都会告诉你，如果不是开利博士的发明，整个世界的生产率将会下降40%；不会出现深海渔业；西斯廷大教堂的米开朗基罗的壁画将会腐烂；深层采矿业将不会存在……”。“开利博士的发明”指的就是空调。

现代空调行业才已走过了一百多年的历史。最早的空调是面向设备(而不是面向人)的工艺性空调。1902年，美国人威利斯·开利博士为纽约布鲁克林区一家印刷厂的生产工艺设计了，世界上第一个空调系统。1924年，美国底特律的Hudson百货商店安装了刚刚问世的离心式制冷机，使其生意一下子红火起来。而后，美国各个城市的电影院、剧院也都纷纷安装了空调，从而步入了舒适性空调的时代。舒适性空调的目的在于为人们提供舒适的空气环境。

空调制冷技术的诞生是建筑技术史上的一项重大进步，它标志着人类从被动地适应宏观自然气候发展到主动地控制建筑微气候，在改造和征服自然的道路上又迈出了坚实的一步。

对于各类建筑的空调系统来说，全年运行能耗的50%甚至更高用于输送空气和水的风机、水泵。因此，减少输送能耗引人注目。机组分散布置、系统小型化就是措施之一。而变水量(VWV)、变风量(VAV)和变制冷剂流量(VRV)系统的研究和应用，大大促进了制冷空调技术的发展。总之，与机器设备调速技术相结合的变流量技术可以大大提高空调系统与设备的能源利用率。

应用BAS对暖通空调系统工艺流程的自动控制和节能管理，其目的就在于以最小的能源代价获取令人满意的热舒适性和室内空气品质。

案例小结

空调百年的历史就是不断技术创新的历史。BAS对空调系统的控制需要实现舒适性与节能性两方面的平衡。

4.1 概　述

暖通空调是供暖、通风和空气调节系统的总称，英文名称为Heating Ventilation and Air Conditioning，缩写为HVAC。暖通空调系统是智能建筑创造舒适、高效的工作和生活环境不可缺少的重要环节。在智能建筑中，暖通空调系统的耗电量占全楼总耗电量的50%以上，其监控点数量常常占全楼BAS监控点总数的50%以上。因此，对暖通空调系统的监控在建筑设备自动化系统(BAS)中占有十分重要的地位。

BAS建设的主要目的是为了降低建筑设备系统的运行能耗和减轻运行管理的劳动强度，提高设备运行管理的水平。通过BAS对暖通空调系统的监控，可以实现对暖通空调系统的最优化控制，并最大限度地实现暖通空调系统的经济运行，降低运行费用，这具有十分重要的意义。

为实现BAS对暖通空调系统的监控管理，需要专业技术人员具备暖通空调和控制两方面的知识。只有了解作为受控对象的暖通空调的工作流程和特性要求，才能采用恰当的控制策略，BAS才能更好地发挥作用。暖通空调系统的监控内容和功能见表4-1。本章将围绕室内空气环境的控制，介绍空调系统的工艺知识和BAS监控的原理。而冷热源设备的控制将在下一章介绍。



表 4－1　暖通空调系统的监控内容和功能

设备名称	监控功能
压缩式制冷系统	1. 启停控制和运行状态显示
	2. 冷冻水进出口温度、压力测量
	3. 冷却水进出口温度、压力测量
	4. 过载报警
	5. 水流量测量及冷量记录
	6. 运行时间和启动次数记录
	7. 制冷系统启停控制程序的设定
	8. 冷冻水旁通阀压差控制
	9. 冷冻水温度再设定
	10. 台数控制
	11. 制冷系统的控制系统应留有通信接口
蓄冰制冷系统	1. 运行模式(主机供冷、融冰供冷与优化控制)参数设置及运行模式的自动转换
	2. 蓄冰设备的溶冰速度控制，主机供冷量调节，主机与蓄冰设备供冷能力的协调控制
	3. 蓄冰设备蓄冰量显示，各设备启停控制与顺序启停控制
空气处理系统	1. 风机状态显示
	2. 送回风温度测量
	3. 室内温、湿度测量
	4. 过滤器状态显示及报警
	5. 风道风压测量
	6. 启停控制
	7. 过载报警
	8. 冷、热水流量调节
	9. 加湿控制
	10. 风门控制
	11. 风机转速控制
	12. 风机、风门、调节阀之间的联锁控制
	13. 室内CO_2浓度监测
	14. 寒冷地区换热器防冻控制
	15. 送回风机与消防系统的联动控制
变风量(VAV)系统	1. 系统总风量调节
	2. 最小风量控制
	3. 最小新风量控制
	4. 再加热控制
	5. 变风量(VAV)系统的控制装置应有通信接口
排风系统	1. 风机状态显示
	2. 启停控制
	3. 过载报警

设备名称	监控功能
吸收式制冷系统	1. 启停控制和运行状态显示
	2. 运行模式、设定值的显示
	3. 蒸发器、冷凝器进出口水温的测量
	4. 制冷剂、溶液蒸发器和冷凝器温度、压力的测量
	5. 溶液温度压力、溶液浓度值及结晶温度的测量
	6. 启动次数、运行时间的显示
	7. 水流、水温、结晶保护
	8. 故障报警
	9. 台数控制
	10. 制冷系统的控制系统应留有通信接口
冷冻水系统	1. 水流状态显示
	2. 水泵过载报警
	3. 水泵启停控制及运行状态显示
热力系统	1. 蒸气、热水出口压力、温度、流量显示
	2. 锅炉汽泡水位显示及报警
	3. 运行状态显示
	4. 顺序启停控制
	5. 油压、气压显示
	6. 安全保护信号显示
	7. 设备故障信号显示
	8. 燃料耗量统计记录
	9. 锅炉(运行)台数控制
	10. 锅炉房可燃物、有害物质浓度监测报警
	11. 烟气含氧量监测及燃烧系统自动调节
	12. 热交换器能按设定出水温度自动控制进汽或水量
	13. 热交换器进汽或水阀与热水循环泵联锁控制
	14. 热力系统的控制系统应留有通信接口
冷却系统	1. 水流状态显示
	2. 冷却水泵过载报警
	3. 冷却水泵启停控制及运行状态显示
	4. 冷却塔风机运行状态显示
	5. 进出口水温测量及控制
	6. 水温再设定
	7. 冷却塔风机启停控制
	8. 冷却塔风机过载报警
风机盘管	1. 室内温度测量
	2. 冷、热水阀开关控制
	3. 风机变速与启停控制
整体式空调机	1. 室内温、湿度测量
	2. 启停控制

4.2 暖通空调系统工艺流程的认知

4.2.1 空气调节的任务

空气调节系统是为使室内空间达到一定的空气参数要求，而采用的各种设备、冷热介质输配系统及自动控制系统的总称。如图4.1所示某一空调系统的示意图。此图表明，影响室内空气参数的干扰因素包括室内的生产过程和人体产生的热、湿，还包括室外的太阳辐射和气候条件的变化。空气调节的任务是对空气进行加热、冷却、加湿、干燥等处理，克服室内外干扰因素对空气环境参数的影响，使室内空气的温度、湿度与洁净度等参数稳定在一定范围内，以满足人的舒适性要求或生产工艺要求。

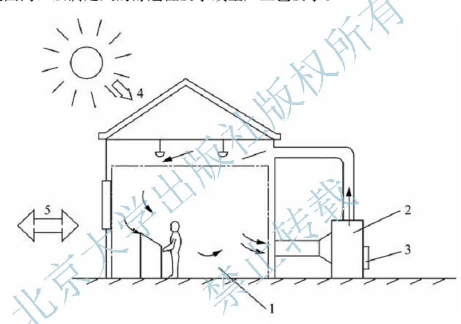


图4.1 空调系统示意图

1—受控工作区；2—送风系统；3—经过滤的新鲜空气；4—太阳辐射；5—室外气温变化

4.2.2 空调系统的被控参数

对于人们的居住空间，所调节的空气参数应以人体的舒适性为目的；对于生产工艺所需的空气环境应以具体的工艺要求为空气调节的依据。一般来说，空调系统的被控参数主要有空气的温度、湿度、洁净度、气流速度和空气品质等。

1. 温度调节

空气温度是衡量热舒适性最常用的指标，也被最广泛地认识。温度调节的目的是保持室内空气具有合适的温度，温度调节的过程实质上是增加或减少空气所具有的显热的过程。从医学保健的角度来说，室内环境与室外的温差不要过大，一般5℃左右的温差对人体的健康比较有益。对于大多数的人来说，居住室温夏季保持在25～27℃、冬季保持在18～20℃比较适合。对于生产科研单位则根据工艺要求确定温度值。

2. 湿度调节

湿度调节的目的是调节空气中水蒸气的含量，使之保持合适的湿度。湿度调节的过程实质上是增加或减少空气所具有的潜热的过程。空气过于潮湿或者是过于干燥都会使人感到不舒服。一般来说，室内的相对湿度冬季应保持在40%～50%之间，夏季应保持在50%～60%之间，这样人的感觉比较好。

3. 空气的洁净度调节

空气中悬浮的固体或液体微粒吸进气管、肺后，会对人体健康带来危害。因此，有必要在空气调节过程中对空气进行过滤净化，提高其洁净度。净化的方法有：通风过滤、吸附、吸收和催化燃烧等。民用建筑的空调系统一般采用过滤器进行过滤处理。

4. 气流速度调节

空气的温度、湿度调节，需要靠空气的流动才能实现，空气调节与分配直接影响着空调系统的使用效果。一般地，适当低速流动的空气环境比静止的空气环境更舒适，而变速的气流比恒速的气流更觉舒适。一般地，空气流速以冷气0.3m/s和0.5m/s暖气为宜。在工业生产中，还可通过对气流速度进行控制把有害物质和灰尘局部排出。

5. 室内空气质量

室内空气质量(Indoor Air Quality，IAQ)是用来指示环境健康和适宜居住的重要指标。在楼宇自控系统中，常用二氧化碳(CO_2)的浓度来反映室内空气的质量。为保证人的生理健康，室内CO_2浓度应不低于0.1%，因此必须保证足够的新风量。

特别提示

空调系统所处理的空气，在常温常压下，只有水蒸气易发生状态变化。而干空气的组分在常温常压下是不会发生状态变化的。水蒸气与液态水间的状态变化将携带大量的潜热，这比因温度变化所需的显热大得多。水蒸气的在湿空气中含量虽少，但其变化却对空气环境的干燥和潮湿程度产生重要影响，且使湿空气的物理性质随之改变。因此，在空气调节分析中是依据是否含有水蒸气来对空气进行组分划分的，研究湿空气中水蒸气的含量在空气调节中占有重要地位。

知识链接

空气的性质

暖通空调设备所处理的介质是空气，其主要任务就是使空调空间的空气温度、湿度、流动速度及洁净度达到期望的数值。为此，我们需要较全面地了解空气的性质。

1. 湿空气与饱和空气

根据空气中是否含有水蒸气，有干空气和湿空气之说。干空气由氮(N_2)75.55%(质量比)、氧(O_2)23.1%、二氧化碳(CO_2)0.05%和稀有气体1.3%等组成。湿空气由干空气和水蒸气组成。另外，空气中还含有不同程度的灰尘、微生物和其他气体杂质。自然界中的空气属于湿空气。空调主要是解决空气的温度和湿度问题。



在一定温度下，空气只能容纳一定数量的水蒸气，超过这一定数量后，多余的水蒸气就会凝结为水从空气中析出来。因此，在某一温度下，一定量空气中所含水蒸气量达到最大值时，这时的湿空气称为饱和空气，对应的状态称为饱和状态。饱和状态下空气的温度称为饱和温度；饱和状态下湿空气中水蒸气的分压力达到当时温度所对应的饱和压力。湿空气容纳水蒸气量的限度与温度有关，温度越高，空气能容纳的水蒸气量也越大。

2. 干球温度和湿球温度

在空气调节的过程中，温度是衡量空气环境对人体和生产是否合适的一个重要参数。空调的温度通常是用干球温度(t)和湿球温度(t_s)来表示的。

干球温度计是由两支相同的温度计组成。一支是干球温度计，直接测量空气本身的温度(即干球温度)；另一支是湿球温度计，在感温球上包湿布(湿球)后测得的温度(湿球温度)。在湿空气未达到饱和时，湿球温度计湿布上的水分就会蒸发吸收一部分汽化潜热，所以湿球温度计上的读数要低些。空气的相对湿度愈小，水分蒸发就愈快，湿球温度降低的幅度就愈大。比较这两个温度值可计算出相对湿度。

3. 大气压力和水蒸气分压力

环绕地球的空气层对单位地球表面的压力称为大气压力(或湿空气总压力)，通常用 B 表示。空气中的水蒸气是和干空气同时存在的，这时两种气体各有自己的压力，分别为干水蒸气分压力 p_c 和空气分压力 p_g。两者之和应该是空气的总压力，即 $B=p_g+p_c$。

水蒸气分压力的大小反映了水蒸气的多少，是空气湿度的一个指标。此外，空气的加湿、干燥处理过程是水分蒸发到空气中去或水蒸气从空气中冷凝出来的交换过程。这种交换和空气中的水蒸气分压力相关。

4. 绝对湿度、相对湿度和含湿量

人体所感觉的冷热程度，不仅与空气温度的高低有关，而且还与空气中水蒸气的多少有关，即与湿度有关。空气中的湿度有以下几种表示方法。

$1m^3$ 湿空气中所含水蒸气的质量称为空气的绝对湿度。空气的绝对湿度只能说明在某一温度下 $1m^3$ 空气中所含水蒸气的实际质量，不能准确说明空气的干湿程度。

把 1kg 干空气所含的水蒸气质量(由于数量不大，一般用 g 来衡量)称为空气的含湿量，用 d 表示，单位为：g/(kg·干空气)。比如，在 10kg 湿空气中，已知干空气的质量 $G_g=9.95$kg，则水蒸气质量 $G_c=10-9.95=0.05$(kg)，则含湿量 $d=(1000\times0.05)/9.95=5.025$ g/(kg·干空气)。在空调系统中，含湿量和温度一样，是一个十分重要的参数，它反映了空气中水蒸气量的多少。在任何空气发生变化的过程中，如加湿或干燥过程，都必须用含湿量来反映水蒸气量增减的情况。

相对湿度可以表征空气的干湿程度，是空气调节系统中很重要的一个概念(有关概念在第 2 章“湿度传感器”一节中已做介绍)。如 $\phi=100\%$，对应的空气状态为饱和空气；如 $\phi=0$，对应的空气状态为干空气。

5. 露点温度

在一定的大气压力下，保持空气的含湿量不变，冷却空气达到相对湿度 $\phi=100\%$ 时，这时所对应的温度称为该空气的露点温度，记为 t_1。湿度愈大，露点与实际温度之差就愈小。等压冷却空气至水蒸气凝结的过程，经历了两个阶段，即降低空气温度使空气由不饱和空气达到饱和空气状态，再由饱和到水蒸气凝结而成水珠。在凝结水珠之前，空气的含湿量保持不变。

在一些冷表面上往往会发生结露现象，能否产生结露，其规律可以归纳以下：

(1) 冷表面的温度 $t<$ 冷表面所在空气环境的露点温度 t_1 时，结露。

(2) 冷表面的温度 $t\geqslant$ 冷表面所在空气环境的露点温度 t_1 时，不会结露。

在空气调节中，有时需要结露，有时不需要结露。

6. 焓

在空气调节中，空气的压力变化一般很小，可近似于定压过程，因此可直接用空气的焓变化来度量空气的热量变化。空气的焓反映了一定状态下空气所含能量的多少。

湿空气的焓也是以1kg干空气作为计算基础的，湿空气的焓是1kg干空气的焓加上与其同时存在的$d$kg水蒸气的焓，称为$(1+d)$kg湿空气的焓，用h表示(有的书籍采用i表示)，单位是kJ/(kg·干空气)。一般近似地认为0℃时湿空气的焓为0kJ/kg。t℃空气的焓可以近似的用下式求得：

$$h=1.01t+(2500+1.84t)d=(1.01+1.84d)t+2500d$$

上式表明，空气的焓主要是由与空气温度t有关的t项以及与含湿量d有关的d项这两部分组成，前者随温度变化，一般称为显热部分；后者随含湿量变化，一般称为潜热部分。

7. 焓湿图

在空调工程中，常会借助焓湿图(h-d图)对空气处理过程进行分析。焓湿图以空气的焓h和含湿量d为坐标轴(两坐标夹角为135°)，把一定大气压下空气的温度t、含湿量d、相对湿度ϕ以及水蒸气分压力p_c等参数用图线表示出来，如图4.2所示。图上h、d的取值都以含1kg干空气的湿空气为计算基准。焓湿图上绘有下列等值线簇和读数线。

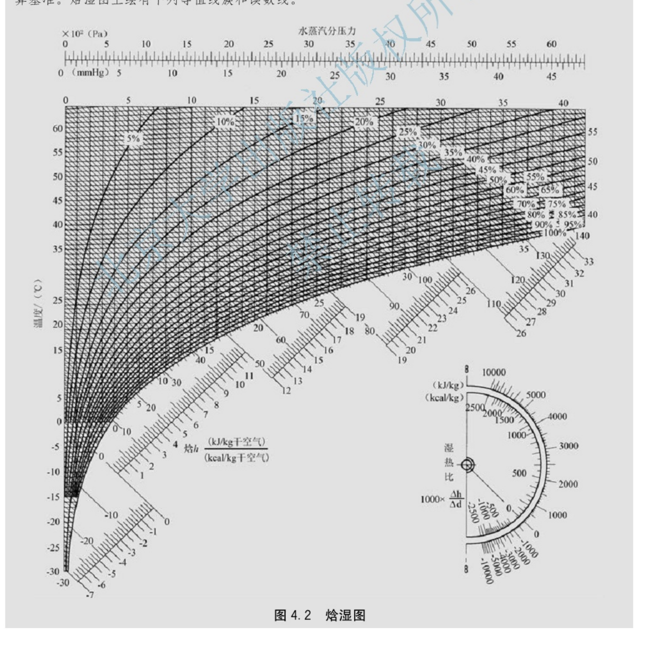


图4.2　焓湿图

(1) 等含湿量线(等 d 线)。等 d 线是相互平行的纵线。

(2) 等焓线(等 h 线)。等 h 线是与等 d 线夹角约 135°的平行线。

(3) 等干球温度线(等 t 线)。等 t 线是一簇近似水平的直线。

(4) 等相对湿度线(等 ϕ 线)。等 ϕ 线是一簇自图面左下向右延伸的下凹曲线,读数标在曲线上。$\phi=100\%$的等 ϕ 线上各点与空气的饱和状态对应,称为饱和线或露点轨迹线;$\phi=0$ 线则与 $d=0$ 线重合而共线。

(5) 水蒸气分压力 p_c的读数线。由于 p_c与 d 有一一对应的关系,所以 p_c的读数线一般与 d 读数线相邻,或通过读数变换线绘于图面右边框的下部。

(6) 等湿球温度线(等 t_s线)。大多数 h-d 图用等 h 线近似表示等 t_s线,所以 h 和 t_s也一一对应。

注意:d 的大小与大气压 B 有关,应根据不同的 B 值来选择不同的 h-d 图,B 的允许选择误差为 2666Pa(合 20mmHg)。

8. 焓湿图的应用

焓湿图可用于确定湿空气的状态参数和表示空气状态变化的过程。

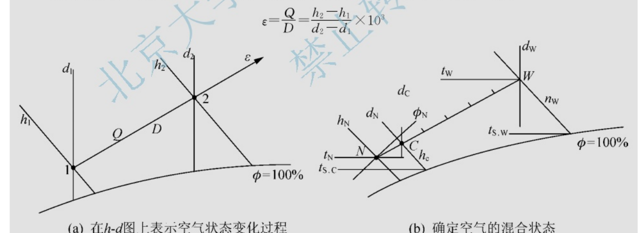
1) 确定湿空气的状态参数

已知空气的 t、ϕ、d、p_c、h、t_s等独立参数中的任意两个参数,那么 h-d 图上代表此两个参数的等值线的交点就是空气的状态点。通过此状态点的其他等值线的标度值,就是空气在该状态下的其余参数值。注意,露点和湿球温度的轨迹线虽然都是 $\phi=100\%$的饱和线,但露点是 d 线与饱和线交点对应的温度;而湿球温度则是 h 线与饱和线交点对应的温度。

2) 表示空气状态变化的过程

设含有 1kg 干空气的湿空气因加入热量 Q 和湿量 D 后,由状态 1(h_1,d_1)变化到状态 2(h_2,d_2),在 h-d 图上对应此两状态的两点 1 和 2 的连线,就代表这一状态变化过程的方向。这一方向可用直线 1 2 的斜率 ε 来表示,如图 4.3(a)所示。过程线的斜率 ε 称为热湿比,其表达式为:

$$\varepsilon=\frac{Q}{D}=\frac{h_2-h_1}{d_2-d_1}\times10^3$$



(a) 在h-d图上表示空气状态变化过程　　(b) 确定空气的混合状态

图 4.3　焓湿图的应用

初态和终态都不相同的空气状态变化过程,只要起点与终点连线的斜率相同,或者说只要热湿比 ε 相同,则变化过程的方向就相同,在 h-d 图上它们的变化过程线应彼此平行。为便于确定过程线,在 h-d 图上一般都绘有热湿比辐射线(又称 ε 线,见图 4.2 右下角处)。实际应用时可根据已知的空气状态变化过程的热湿比确定 ε 线,然后平移该 ε 线至已知的空气状态点上,则该空气状态变化过程线即得到确定。应注意,同一热湿比的数值随计算单位(kJ/g 或 kcal/kg)的不同而不同,应根据所用单位来选用相应的 ε 线。

3）求空气的混合状态

空调系统通常采用新风(室外新鲜空气)和室内回风(室内循环空气)混合，再经空调装置处理后送风。设计计算或选择设备时，都需确定空气的混合状态。如图4.3(b)所示，设新风状态点为W，则有h_W、d_W和新风量G_W；回风状态点为N，则有h_N、d_N和回风量G_N；混合后的状态点为C，则有h_C、d_C和混合后的空气量$G_C=G_W+G_N$。状态点C具有以下特点：混合前后空气的能量守恒(热平衡)；混合前后水蒸气的质量守恒(湿平衡)；状态点C必在混合前两种空气的状态点的连线上；状态点C分割该连线为两段的长度，和参与混合的两种气体量的大小成反比，即

$$\frac{NC}{CW}=\frac{G_W}{G_N} \text{ 或 } \frac{WC}{CN}=\frac{G_N}{G_W}$$

如图4.3(b)所示，若$G_N=5G_W$，则$5NC=CW$，C点靠近气体量较大的N点处。若两种空气量之比不是整数，可先计算h_c，即

$$h_c=\frac{G_N h_N+G_W h_W}{G_N+G_W}$$

得到h_c后，则$h=h_c$的等焓线与N、W两点连线的交点就是混合状态点C。

空调工程中的风量常采用体积流量$L(\mathrm{m^3/h})$，L与质量流量G的关系为$G=L\rho(\mathrm{kg/h})$，换算时一般取空气的平均密度$\rho=1.2\mathrm{kg/m^3}$。

4.2.3 空调的热、湿负荷

1. 空调的热、湿负荷的概念

对空调系统来说，总存在一些干扰因素使空调房间内的温度、湿度等参数发生变化。我们把干扰因素对室内产生的影响称为负荷。把为保持一定的温度条件而向房间内提供的冷量(热量)称为冷负荷(热负荷)。把为维持一定的相对湿度所需要除去的湿量称为湿负荷。空调系统通过排除室内的热湿负荷，使房间内的温度和湿度维持在要求的参数范围内。

2. 热湿来源分析

空调房间内的热湿负荷是由诸多因素构成的，其中热负荷主要由下述因素构成：

(1) 通过房间的建筑围护结构传入室内的热流量。

(2) 透过房间的外窗进入室内的太阳辐射的热流量。

(3) 房间内照明设备的散热量。

(4) 房间内人体的散热量。

(5) 房间内电气设备或其他热源的散热量。

(6) 室外空气渗入房间的热流量。

(7) 伴随各种散湿过程产生的潜热量。

上述因素中，除通过房间建筑围护结构和太阳辐射的热量及室外空气渗入的热流量是室外热源负荷外，其他均为室内热源负荷。

空调房间内的湿负荷是由下述因素构成的：

(1) 房间内人体的散湿量。

(2) 房间内各种设备、器具的散湿量。

（3）各种潮湿物表面或液体表面的散湿量。

（4）各种物料或饮料的散湿量。

空调负荷还可以分为房间负荷和系统负荷两种。发生在空调房间内的负荷称为房间负荷；还有一些发生在空调房间以外的负荷，如新风状态与室内空气状态不同所引起的新风负荷、风管传热造成的负荷等，它们不直接作用于室内，但最终也要由空调系统负担。将以上两种负荷统称为系统负荷。

3. 空调负荷的估算

1）夏季冷负荷的估算

（1）简单计算法。估算时，以围护结构和室内人员的负荷为基础，把整个建筑物看成一个大空间，按各面朝向计算负荷。室内人员散热量按每人116.3W计算，最后将各项数量的和乘以新风负荷系数1.5即为估算结果。

$$Q=(Q_W+116.3N)\times1.5$$

$$Q_W=KA\Delta t$$

式中 Q——空调系统的总负荷，W；

Q_W——围护结构引起的总冷负荷，W；

N——室内人员数；

K——围护结构的传热系数，W/(m^2·℃)，计算时需查阅相关手册；

A——围护结构的传热面积，m^2；

Δt——室内外空气温差，℃。

（2）单位面积估算法。单位面积估算法是一种将空调负荷单位面积上的指标乘以建筑物内的空调面积，得出制冷系统负荷的估算值。

部分建筑制冷系统负荷的估算指标：

办公楼	95～115W/m^2
超高层办公楼	105～115W/m^2
旅馆	95～115W/m^2
餐厅	290～350W/m^2
百货商场	210～240W/m^2
医院	105～130W/m^2
剧场	230～350W/m^2

2）冬季热负荷的估算

可利用单位面积估算法，将空调负荷单位面积上的指标乘以建筑物内的空调面积，得出供暖系统负荷的估算值。

部分建筑供暖系统负荷的估算指标：

办公楼、学校	60～80W/m^2
旅馆	60～70W/m^2
餐厅	115～140W/m^2
医院	65～80W/m^2
剧场	95～115W/m^2

4.2.4 空调系统的组成

空调系统一般由冷热源、空气处理设备、空调风系统(空气输送及分配设备)、空调水系统(冷热媒输送设备)和自动控制部分等组成。

1. 冷源或热源

空调系统工作所需的冷量和热量分别由冷源和热源提供。冷热源设备是建筑设备系统中最核心、最具经济价值的设备之一，对保证其安全、高效地运行具有重要意义。

冷源用来提供冷量，以对空调房间的空气进行冷却处理。冷源设备包括冷水机组(有蒸气压缩式、吸收式等形式)、冷冻水系统和冷却水系统。冷源的主要设备一般设置在冷冻机房(冷冻站)，而热源则用来提供热量，以对空气进行加热处理。热源设备包括提供蒸气或热水的锅炉机组(或城市热网)、热交换器等。热源设备一般设置在热力站(锅炉房)。

有关冷源和热源的知识将在下一章深入介绍。

2. 空气处理设备

空气处理设备负责对空气进行过滤和各种热湿处理，包括空气过滤器、预热器、喷水室、再热器等。其作用是将送风空气处理到一定参数要求的空气状态。

3. 空调风系统

空调风系统主要包括空气输送设备、空气分配装置等。空气输送设备包括风机(输送空气的动力设备)、风道，以及调节阀、防火阀、消声器、风机减振器等配件，其作用是将经过处理的空气按照预定要求输送到各个房间，并从房间抽回或排出一定量的空气。空气分配装置包括各种送风口(如百叶风口、散流口)和回风口，其作用是合理地组织室内气流，以保证工作区(通常指离地 2m 以下的空间)内有均匀的温度湿度、气流速度和洁净度。

4. 空调水系统

空调水系统包括冷冻水(空调热水)系统和冷却水系统。冷冻水系统(空调热水)将冷冻水(热水)从冷(热)源输送至空气处理设备或者风机盘管之类的末端设备。冷却水系统是制冷系统的冷却水装置，包括冷却水塔和冷却水管系统。输送水的动力设备是水泵。

5. 控制、调节装置

由于空调、制冷系统的工况应随室内外空气状态的变化而变化，所以要经常对有关装置进行调节。这一调节可以是人工进行的，也可以是自动控制的。不论是哪一种方式，都要配以一定的装置和设备。

4.2.5 空调系统的分类

1. 根据空调系统的用途分类

1）舒适性空调

舒适性空调以满足人的舒适性要求为目的。舒适性空调调节室内空气参数，营造适宜人们工作生活的室内环境，从而有利于提高工作效率或维持良好的健康水平。

2）工艺性空调

工艺性空调以满足室内的生产、科研等工艺过程为目的。例如电子、光学仪器、精密制造装配车间、电子计算机房、手术室等场所，如果空气参数不能满足要求，则会导致工作无法进行或者产品质量得不到保证。

2. 根据空气处理设备的集中程度分类

1）集中式空调系统

集中式空调系统的冷热源集中设置在冷冻站和热力站，并且所有的空气处理设备及通风机也都集中在空调机房，空气通过集中处理后，再送往各个空调房间。如图 4.4 所示典型的集中式空调系统。

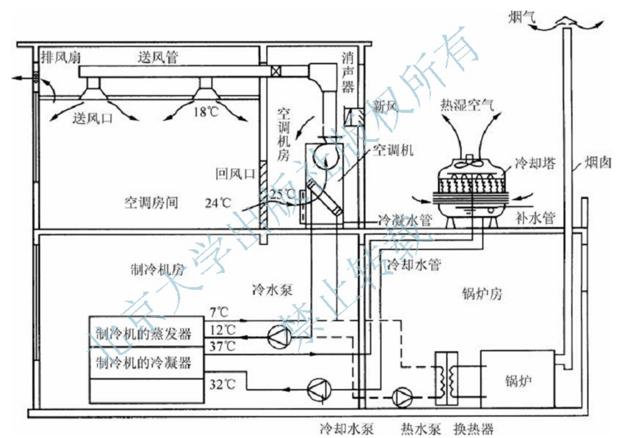


图 4.4 典型的集中式空调系统

通常，把由空气处理设备及通风机组成的箱体称为空调箱或空调机组，把不包括通风机的箱体称为空气处理箱或空气处理室。单风道空调系统、双风道空调系统及变风量空调系统均属集中式空调系统。集中式空调系统广泛应用于各类舒适性或工艺性空调工程中。

集中式空调系统的空气处理设备和制冷设备集中布置在机房内，便于集中管理和集中调节；过渡季节可充分利用室外新风，减少制冷机运行时间；可以严格控制室内温度、湿度和空气洁净度；对空调系统可以采取有效的防震消声措施；使用寿命长。

但由于所有空气都在空调机房的空调箱中处理，风道过粗、过长、布置复杂，因此有机房面积大、占用建筑空间较多、风道安装工作量大、施工周期较长、风管系统各支路和

风口的风量不易平衡、不易防火等缺点。对于房间热湿负荷变化不一致或运行时间不一致的建筑物，集中式空调系统运行不经济。

知识链接

排风、回风、新风专业术语

楼宇自控技术人员应对空调系统中常用的术语，如排风、回风、新风，有所了解。下面以图4.5所示的集中式空调系统为例，解释相关术语。

从室外引进到室内的新鲜空气，称为新风。通过新风机或风口将新风吸入室内，吸入的新风与室内的回风在混合段混合，通过空气过滤器处理空气中的杂质及有害物，然后经过加湿器对空气进行加湿(空气湿度达标，则可不进行加湿)，再经过表冷器实现对空气进行冷却除湿处理。空气经过上述处理后送到室内，可以消除室内的冷负荷和湿负荷。图中所示的回风机的作用是从室内吸出空气，其中的一部分空气用于再循环，称为回风，回风与新风混合，经处理后再送入房间；另一部分直接排到室外，称为排风。实际工程中回风机可以设置，也可以不设置。不设置时，系统通过门窗缝隙排风。

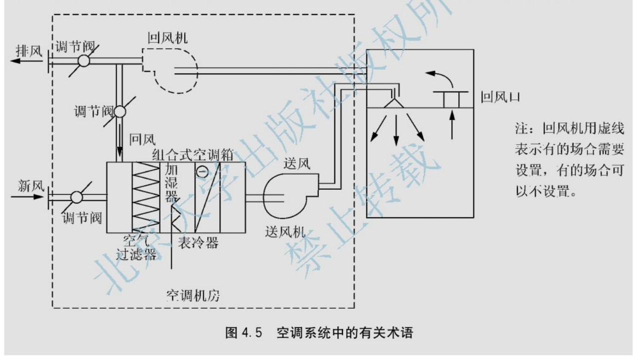


图4.5 空调系统中的有关术语

2）半集中式空调系统

半集中式空调系统的冷热源集中设置在冷冻站和热力站。但空气调节由分散在各个房间的空调末端设备(如风机盘管)来就地实施。冷热源提供的冷量(热量)经由冷冻水(热水)系统输送到空调末端设备。全水系统、空气-水系统、水源热泵系统、诱导器系统、风机盘管系统等均属此类。

集中式空调系统和半集中式空调系统两者的冷源、热源都是由集中设置的冷冻站、锅炉房或热交换站供给。通常，把集中式和半集中式空调系统统称为中央空调。

3）分散式空调系统

把空气处理设备、风机及冷热源都集中在一个箱体内，分散安装在各个房间，就地进行空气调节，此即为分散式空调系统。常用的有窗式空调器和柜式、壁挂式空调器等。

3. 根据负担室内热湿负荷所用的介质不同分类

1）全空气系统

全空气系统是指空调房间的室内负荷全部由经过处理的空气来负担的空调系统，如图 4.6(a)所示。集中式空调系统、“全空气”诱导器系统属此类。由于空气的比热和密度都小，所以这种系统需要的空气量多，风道断面尺寸大。

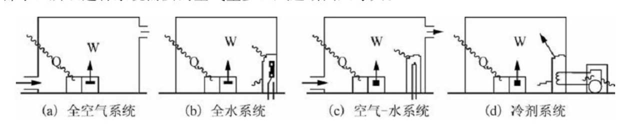


图 4.6 根据负担室内热湿负荷所用的介质不同分类

Q—热负荷；W—湿负荷

2）全水系统

如果空调房间的热湿负荷全部由冷水或热水来负担则称为全水系统，如图 4.6(b)所示。风机盘管及辐射板系统属于此类。由于水的比热容及密度比空气大，所以在室内负荷相同时，需要的水管断面尺寸比风道小。不过靠水只能消除余热和余温，达不到通风换气的目的。

3）空气-水系统

如果空调房间的负荷由空气和水共同负担，则称为空气-水系统，如图 4.6(c)所示。诱导器系统和风机盘管加新风系统均属此类。局部再加热或再冷却的系统也属此类。它们的优、缺点介于前两者之间。

4）冷剂系统

冷剂系统是指空调房间的负荷由制冷剂直接负担的系统。安装在空调房间或其邻室的空调机组属于这类系统，如图 4.6(d)所示。空调机组按制冷循环运行可以消除房间余热、余湿；空调机组按热泵循环运行可为房间供暖，因此使用更灵活、方便。

4. 根据空调系统使用的空气来源分类

1）封闭式空调系统

封闭式系统全部使用室内再循环的空气，如图 4.7(a)所示。因此，这种系统最节能，但是卫生条件也最差，它只适用于无人操作、只需保持空气温、湿度的场所及很少进人的库房。

2）直流式空调系统

直流式空调系统[图 4.7(b)]全部使用室外新风，空气从百叶栅进入，经处理后达到送风状态，送入房间后，吸收余热、余湿后又全部排掉，因而室内空气得到百分之百的交换。直流式空调系统的舒适性高，但耗能巨大，运行不够经济，一般只有特殊的有毒车间、放射性实验室等场合应用。该系统适用于产生有毒物质、病菌及放射性有害物的空调房间，是一种耗费能量最多的系统。

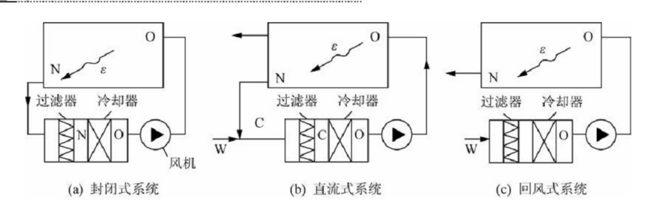


图 4.7　根据使用的空气来源分类的空调系统示意图

N—室内空气状态；W—室外空气状态；C—混合空气状态；O—冷却器后的空气状态

特别提示

单独由新风机组(参见 4.3 节)进行空气集中处理的空调方式即为直流式空调系统。新风机组常与风机盘管系统共同出现，其不存在回风部分因而可以看作是一种直流式空调。

3）回风式空调系统

回风式系统，也称混合式系统。该系统使用的空气一部分为室外新风；另一部分为室内回风，如图 4.7(c)所示。它具有既经济又符合卫生要求的特点，使用比较广泛。在工程上根据使用回风次数的多少又分为一次回风系统和二次回风系统。

知识链接

直流式空调系统的空气处理过程分析

直流式空调系统流程如图 4.8 所示，利用焓湿图对空气处理过程进行分析。

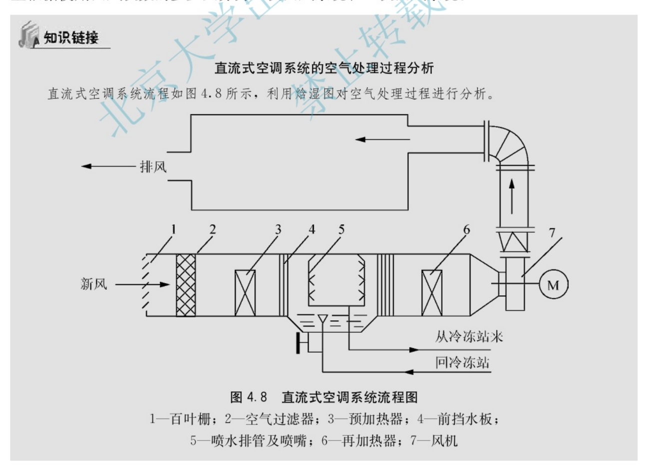


图 4.8　直流式空调系统流程图

1—百叶栅；2—空气过滤器；3—预加热器；4—前挡水板；
5—喷水排管及喷嘴；6—再加热器；7—风机

(1) 直流式空调系统的夏季处理过程的分析。室外空气状态为$W_x(h_{Wx}, d_{Wx})$的新风经空气过滤器过滤后进入喷水室冷却去湿达到机器露点状态$L_x(h_{Lx}, d_{Lx})$(习惯上称相对湿度为90%～95%的空气状态为“机器露点”状态),然后经过再热器加热至所需的送风状态点$O_x(h_{Ox}, d_{Ox})$送入室内,在空调房吸热吸湿后达到状态$N_x(h_{Nx}, d_{Nx})$,然后全部排出室外。整个处理过程可以写为:

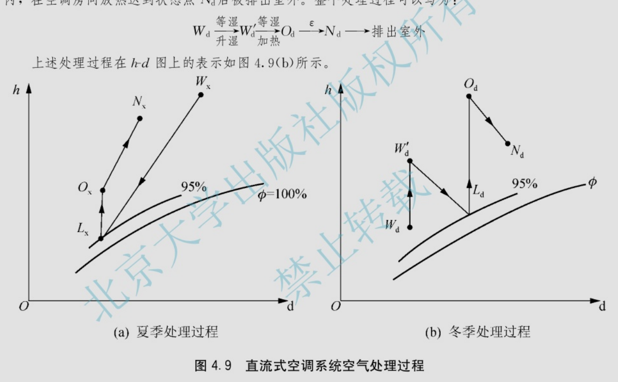
$$W_x \xrightarrow[\text{除湿}]{\text{降温}} L_x \xrightarrow{\text{加热}} O_x \xrightarrow{\varepsilon} N_x \longrightarrow \text{排出室外}$$

上述处理过程在h-d图上的表示如图4.9(a)所示。

(2) 直流式空调系统的冬季处理过程的分析。冬季室外空气一般是温度低,含湿量小,要把这样的空气处理到送风状态必须进行加热和加湿处理。室外空气状态为$W_d(h_{Wd}, d_{Wd})$的新风经空气过滤器过滤后由预热器等湿加热到$W_d(h_{W'd}, W'_d)$点(W'_d应当位于送风状态点O_d的机器露点L_d的等焓线上),然后进入喷水室绝热加湿处理到L_d点。再从L_d点经再热器加热至所需的送风状态点O_d送入室内,在空调房间放热达到状态点N_d后被排出室外。整个处理过程可以写为:

$$W_d \xrightarrow[\text{升温}]{\text{等湿}} W'_d \xrightarrow[\text{加热}]{\text{等湿}} O_d \xrightarrow{\varepsilon} N_d \longrightarrow \text{排出室外}$$

上述处理过程在h-d图上的表示如图4.9(b)所示。



(a) 夏季处理过程　(b) 冬季处理过程

图4.9 直流式空调系统空气处理过程

4.2.6 空气处理设备

1. 空气过滤器

空气过滤器是对空气进行净化处理的设备,通常分为初效、中效和高效过滤器三种类型。初效过滤器主要用于过滤粒径在10～100μm范围的大颗粒灰尘,通常采用金属网格、聚氨酯泡沫塑料及各种人造纤维滤料制作。中效过滤器用于过滤粒径在1～10μm范围的灰尘,常用玻璃纤维、无纺布等滤料制作。高效过滤器用于对空气洁净度要求较高的净化空调。通常采用超细玻璃纤维、超细石棉纤维等滤料制作。如图4.10(a)、(b)所示分别是抽屉式和袋式过滤器。

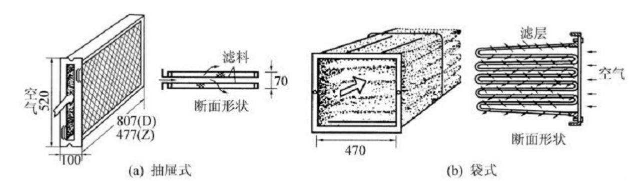


图 4.10 过滤器

若空气过滤器的滤料上积尘太多，则空气的流动阻力会变大，过滤器前后的压差增大。在 BAS 中常采用压差开关监测过滤器前后的压差状况。若压差超过上限值，则应报警，提示应拆换清洗。

2. 表面式换热器

用表面式换热器处理空气时，工作介质通过换热器的金属表面与空气进行热湿交换而不直接和被处理的空气接触。在表面式加热器中通入热水或蒸汽，可以实现空气的等湿加热过程，这称为空气加热器；通入冷冻水或制冷剂，可以实现空气的等湿冷却或减湿冷却过程，这称为空气冷却器，简称为表冷器。

表面式换热器的构造如图 4.11(a)所示。为了增强传热效果，表面式换热器通常采用肋片管制作。肋片管如图 4.11(c)、(d)所示。表面式冷却器的下部应装设集水盘，以接收和排除凝结水。集水盘的安装如图 4.11(b)所示。

表面式换热器具有构造简单、占地面积少、水质要求不高、系统阻力小等优点，因而，在机房面积较小的场合，特别是高层建筑的舒适性空调中得到了广泛的应用。

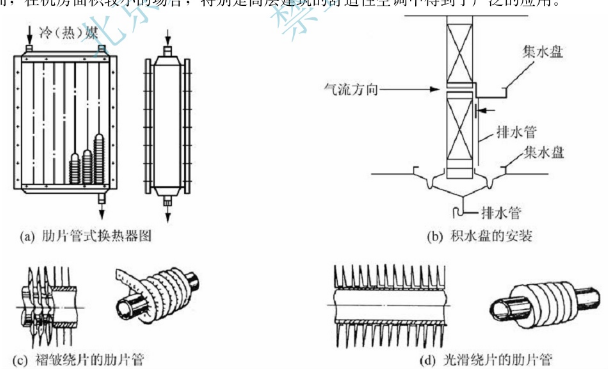
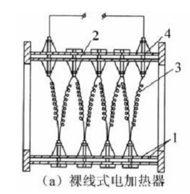


图 4.11 表面式换热器

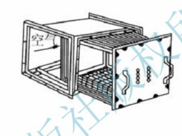
3. 电加热器

电加热器是使电流通过电阻丝发热来加热空气的设备，具有结构紧凑、加热均匀、热量稳定、控制方便等优点。由于耗电费用较高，通常只用在加热量较小的空调机组中。在恒温精度较高的空调系统里，常作为控制房间温度的调节加热器，安装在空调房间的送风支管上。

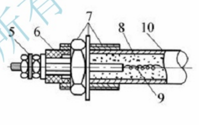
电加热器分为裸线式和管式两种。裸线式电加热器如图 4.12(a)所示，具有结构简单、热惰性小、加热迅速等优点，但电阻丝容易烧断、安全性差。抽屉式电加热器[图 4.12(b)]也是一种裸线式电加热器，管式电加热器[图 4.12(c)]把电阻丝装在特制的金属套管内，套管中填充有导热性好的不导电材料，其优点是加热均匀、热量稳定、经久耐用、使用安全性好，但它的热惰性大，构造也比较复杂。



(a) 裸线式电加热器



(b) 抽屉式电加热器



(c) 管式电加热器

图 4.12 电加热器

1—钢板；2—隔热层；3—电阻丝；4—瓷绝缘子；5—接线端子；6—瓷绝缘子；7—紧固装置；8—绝缘材料；9—电阻丝；10—金属套管

4. 加湿器

加湿器是用于进行空气加湿处理的设备，常用的有干蒸汽加湿器和电加湿器两种类型。

1) 干蒸汽加湿器

干蒸汽加湿器[图 4.13(a)]是利用锅炉等加热设备产生的蒸汽对空气进行加湿处理。为了防止蒸汽喷管中凝结水的产生，蒸汽先进入喷管外套 1，对喷管中的蒸汽加热、保温，然后经导流板进入加湿器筒体 3，分离出凝结水后，再经导流箱 4 和导流管 5 进入加湿器内筒体 6。在此过程中，夹带的凝结水蒸发，最后进入喷管 7，喷出没有凝结水的干蒸汽。干蒸汽加湿器可通过蒸汽调节阀来调节加湿量。

2) 电加湿器

使用电能产生蒸汽来加湿空气的装置称为电加湿器。根据工作原理不同，有电热式和电极式两种，如图 4.13(b)、(c)所示。电热式加湿器是在水槽中放入管状电热元件，元件通电后将水加热产生蒸汽。为避免发生断水空烧现象，依靠浮球阀自动控制补水。电极式加湿器则是利用三根铜棒或不锈钢棒插入盛水的容器中作电极，当电极与三相电源接通后，靠电流从水中流过产生的热量把水加热形成蒸汽。电极式加湿器结构紧凑，加湿量易于控制，但耗电量较大，电极上容易产生水垢和腐蚀，因此，仅适用于小型空调系统。电加湿器可通过电功率变化来调节加湿量。

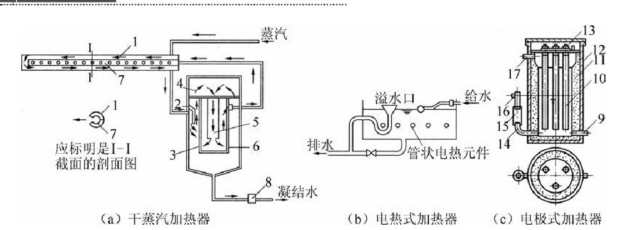


图 4.13 加湿器

1—喷管外套；2—导流板；3—加湿器筒体；4—导流箱；5—导流管；
6—加湿器内筒体；7—加湿器喷管；8—疏水器；9—进水管；10—电极；11—保温层；
12—外壳；13—接线柱；14—溢水管；15—橡皮短管；16—溢水嘴；17—蒸汽出口

5. 除湿机

除湿机是一种对空气进行减湿处理的设备，常用于对湿度要求低的生产工艺、产品贮存以及产湿量大的地下建筑等场所。空调系统中常用的除湿机是冷冻除湿机。冷冻除湿机适用于既要减湿，又不需要降温的场所。但当相对湿度低于 50%或空气的露点温度低于 4℃时，不可使用。这时应采用液体吸湿剂或固体吸附剂去湿。

6. 喷水室

在空调房间的温、湿度要求较高的场合(如纺织厂等工艺性空调系统)常会用到喷水室，如图 4.14 所示。在喷水室中水与空气直接接触，喷入不同温度的水，可以实现对空

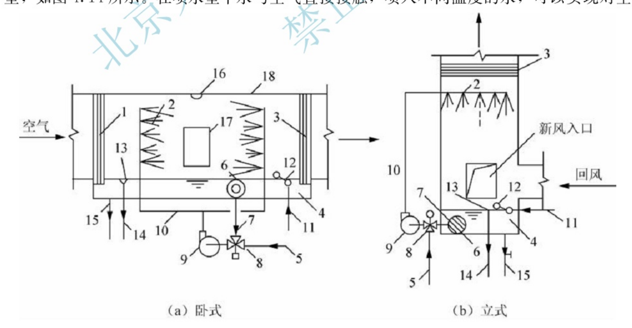


图 4.14 喷水室的构造

1—前挡水板；2—喷嘴与排管；3—后挡水板；4—底池；5—冷水管；6—滤水器；
7—循环水管；8—三通混合阀；9—水泵；10—供水管；11—补水管；12—浮球阀；
13—溢水器；14—溢水管；15—泄水管；16—防水灯；17—检查门；18—外壳

气的加热、冷却、加湿和减湿。喷水室能够实现对空气的多种处理，冬夏季可以共用一套空气处理设备，具有一定的净化空气的能力，并具有金属耗量小、容易加工等优点。但喷水室对水质条件要求高、占地面积大、水系统复杂、耗电较多。

特别提示

上述介绍的都是空气处理系统中某一环节所需的器件或设备。在实际应用中，往往将他们组装成空气处理机组(AHU)、新风机组(PAU)、风机盘管(FCU)等形式。

4.3 半集中式空气调节系统的控制

4.3.1 半集中式空气调节系统简介

1. 概述

在半集中式空调系统中，空气处理过程由集中在空调机房中的集中设备和分布在控制区域的分散设备共同完成。其典型的应用形式是风机盘管(Fan Coil Unit，FCU)加上新风机组(Primary Air-handling Unit，PAU)。这种空调系统的空气处理过程包括PAU对新风的集中处理、配送和分散在控制区域的FCU对空气就地处理两部分。新风机组和风机盘管所用的冷冻水(热水)由冷(热)源集中供应，空调房间热湿负荷由新风机组送进来的空气和进入风机盘管的冷冻水(热水)带入，故属于空气-水系统。

风机盘管空调系统广泛应用于旅馆、公寓、医院和办公室等高级多层的建筑中。对于需要增设空调的小面积、多房间的旧建筑来说，采用这种空调方式也较为合适，因为它占地面积小，易于安装施工。

2. 风机盘管

风机盘管由风机、电动机、盘管、空气过滤器、凝水盘和箱体等器件组成，如图4.15所示。机组箱体由钢骨架和薄钢板制成，其出风格栅做成固定式或可调式。围护面板可以拆卸，便于检修内部设备。明装机组箱体表面喷有彩漆，与建筑装饰相协调，可兼作室内

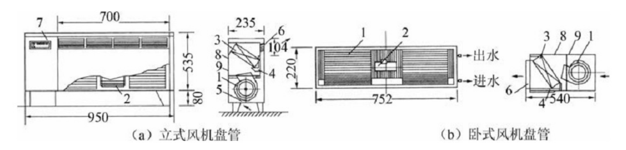


图4.15 风机盘管的组成

1—风机；2—电机；3—盘管；4—凝结水盘；5—循环风进口及过滤器；6—出风口格栅；7—控制器；8—吸声材料；9—箱体

陈设。出风口位置有上出风和前出风两种。风机有高、中、低三挡转速，采用双进风离心式通风机，叶轮由可调速的低噪声电动机驱动，噪声低。盘管一般采用翅片式热交换器，在其下方设有凝水盘以收集凝结水。空气过滤器通常设在机组下部或侧部，用来过滤回风中的尘埃，过滤器做成抽屉式便于进行调换和清洗。

风机盘管作为半集中式空调系统的空调末端装置，直接放在空调房间内。工作时，盘管内流动冷冻水(或热水)，风机把室内空气吸进机组，经过滤后再经盘管冷却(或加热)送回室内，如此循环，以达到调节室内温湿度的目的。

几种常用的风机盘管实物图如图 4.16 所示。风机盘管的选型及布置与空调房间的使用性质、建筑形式有关。对于宾馆客房，一般布置在进门的过道顶棚内，采用卧式暗装机组，如图 4.17(a)所示。这种布置形式美观，不占用房间有效面积，噪声小。从室内气流组织和温度分布均匀的角度来看，这种方式特别适合于夏季使用。对于办公室、医院病房等顶棚无安装位置的房间，一般采用明装立式机组。将其布置在外墙窗下，如图 4.17(b)所示。立式机组多用于空间较大的房间。冬季和夏季室内温度均匀性较好，特别适用于冬季送风。立式机组易于安装，维修方便，但需占用房间的有效使用面积。

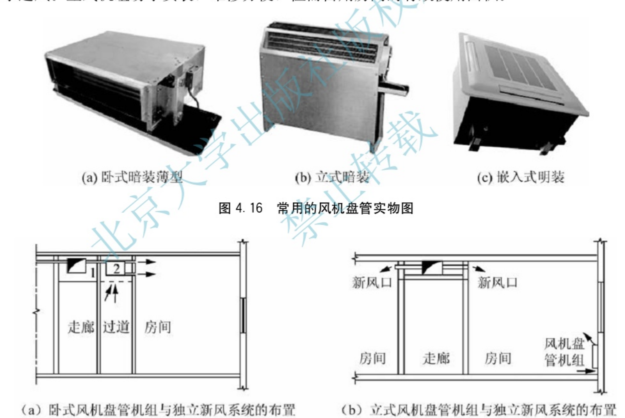


图 4.16 常用的风机盘管实物图

图 4.17 风机盘管在房间内的布置

1—新风管；2—风机盘管机组

3. 风机盘管机组空调系统的新风供给方式

风机盘管则直接安装在各空调区域内，对空调区域内空气进行闭环处理(一般没有新风，完全处理回风)的空调设备。因此，应有合适的引入新风措施，以使室内空气品质得到保证。风机盘管机组新风供给方式有多种，如图 4.18 所示。

如图 4.18(a)所示，室外空气靠房间的门窗等缝隙自然渗入和浴厕机械排风补给新风。风机盘管处理的是室内循环空气，具有投资少和运行费低的优点，但无组织渗漏的新风使室内温湿度分布难以均匀，并且新风供给难以保证，室内卫生条件较差。

如图 4.18(b)所示，在房间外墙打洞作为新风引入风口。新风口做成可调节的形式，冬、夏季按最小新风量运行，过渡季节尽量多采用新风。室内空气参数因受新风负荷的变化，可能产生较大的波动，并且在外墙打洞会影响建筑物的外观。

在一些要求高的场合，往往采用独立新风系统将室外空气经集中处理后由管道送入风机盘管所在的房间，如图 4.18(c)所示。

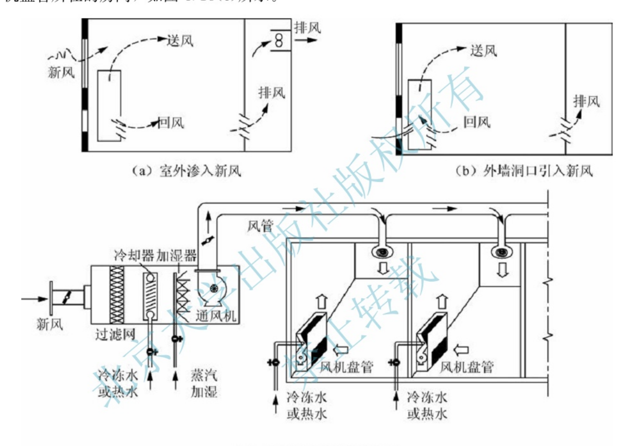


图 4.18　风机盘管系统的新风供给方式

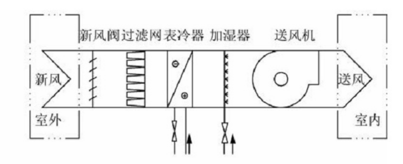
4. 新风机组

新风机组是处理从室外引入的新风的空气调节设备，如图 4.19 所示。新风机组只有一个换热器，冬夏季共用。冬季送入热水对空气进行加热，夏季送入冷冻水对空气冷却。加湿器仅在冬季对新风加湿。新风机组在南方地区作为舒适性空调使用时，往往不包含加湿器。

新风机组通常与风机盘管配合使用，主要是为各房间提供一定的新鲜空气，以满足卫生要求。为避免室外空气对室内温湿度状态的干扰，在送入房间之前需要对其进行热湿处理，例如处理到与室内空气的焓相同的机器露点，新风不再增加室内的空调负荷。室内负荷通常由风机盘管处理。在气候适宜的季节，新风系统直接向室内送风，提高了设备的运



（a）某型号新风机组实物图



（b）新风机组的典型工艺流程图

图 4.19　新风机组实物图及工艺流程图

行经济性和灵活性。这种新风供应方式供给房间的新风量全年都可以得到保证。风机盘管空调系统的新风供给多采用这种方式。



人的新风量需求简介

在室内新风量不足时，会使 CO_2 浓度升高，对人的健康产生诸多危害。长期处于新风量不足的室内易患“室内综合征”，表现为胸闷、头痛头晕、浑身无力、精神萎靡、睡眠不足、免疫力下降等症状。

由于室外灰尘、噪声以及室外空气的各种污染，同时为了避免空调、暖气的能源浪费，许多人养成了常年不开窗的习惯。据有关部门统计：中国人平均新风量小于 $2m^3/h$，严重低于国家标准。

国家标准《室内空气质量标准》(GB/T 18883—2002)确定每人每小时新风量(从室外引入的新鲜空气)不应小于 $30m^3$，这是根据人体生理需求量设定的，如需要保证二氧化碳(CO_2)的浓度不超过国家标准的 0.1%，则必须保证新风量不小于 $30m^3/h$。

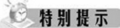
4.3.2　新风机组的控制

本小节以图 4.19 所示的新风机组工艺流程为控制对象，进行 BAS 的监控原理分析和配置设计。

1. 工艺流程分析

新风机组(PAU)是用来集中处理室外新风的空气处理装置，主要由新风阀、过滤器、表冷器(冷/热盘管)、加湿器、送风机等设备构成。新风机组对室外进入的新风进行过滤、温/湿度调节后，配送至各空调区域。下面以图 4.19 为例，分析新风机组的工艺流程。

室外新风通过新风阀的通断控制是否引入新风机组。新风阀应与送风机联动。送风机启动时，新风阀自动打开；送风机停止，新风阀自动关闭。新风进入新风机组后，先经过滤网进行过滤灰尘等颗粒杂物，再经换热盘管与盘管内的冷冻水(热水)进行热交换。通过控制水阀开度可以调节换热量，进而调节空气温度。之后，进入加湿环节。在空气湿度低于设定值时，开启加湿器入口处的蒸汽阀门，蒸汽通过加湿器融入送风的气流进入房间，最终提高房间的相对湿度。通过控制蒸汽阀的开度，可以调节加湿量。风机是新风机组的动力设备，处理过后的空气通过送风机送到空调房间内。



在空调系统中，并不总是需要加湿。在需要供热的建筑中，常常需要用加湿器来进行加湿。但在供冷为主的建筑中，往往不设置加湿器。

2. 监控需求分析

一般根据业主的需求和相关标准确定BAS监控的需求。新风机组的监控功能见表4-2。

表4-2 新风机组的监控功能

序号	监控内容	监控功能
1	新风门控制	参数测量及自动显示，历史数据记录及定时打印、故障报警
2	过滤器堵塞报警	空气过滤器两端压差大于设定值时报警，提示清扫
3	防冻保护	加热器盘管处设置温控开关，当温度过低时开启热水阀，防止将加热器冻坏
4	送风温度自动检测	参数测量及自动显示、历史数据记录及定时打印、故障报警
5	送风温度自动调节	冬季自动调节热水调节阀开度，夏季自动调节冷水调节阀开度，保持送风温度为设定值。过渡季根据新风的温湿度自动计算焓值，进行焓值调节
6	送风湿度自动检测	参数测量及自动显示、历史数据记录及定时打印、故障报警
7	送风湿度自动调节	自动控制加湿阀开断，保持回风湿度为设定值
8	风机两端压差	风机启动后两端压差应大于设定值，否则及时报警与停机保护
9	机组预定时启停控制	根据事先工作及节假日作息时间表，定时启停机组
10	工作时间统计	自动统计机组工作时间，提示定时维修
11	联锁控制	风机停止后，新回风风阀、电动调节阀、电磁阀自动关闭
12	最小新风量控制	在回风管内设置二氧化碳检测传感器，根据二氧化碳浓度自动风阀，在满足二氧化碳浓度标准下使新风阀开度最小，可节能
13	新风温湿度自动检测	参数测量及自动显示、历史数据记录及定时打印、故障报警

3. 新风机组的监控原理分析

新风机组的监控原理如图4.20所示。新风机组通过DDC控制器、送风温度传感器、送风湿度传感器、防冻开关、压差开关、电动调节阀、风阀执行器等现场设备，以及软件编程实现控制功能逻辑。下面就主要控制功能进行分析。

1) 新风阀控制

新风机组的新风阀一般采用通断式风阀驱动器。DDC通过1路DO信号控制新风阀的开与关。当输出高电平时，风阀驱动器打开风阀，低电平时关闭风阀。

新风阀应与送风机联动，进行开关控制。若送风机启动，则新风阀打开；若送风机停机，则新风阀联锁关闭。新风阀关闭可以防止室内冷量(或热量)外逸，减少灰尘进入，保持新风机组内清洁，冬季还可起到盘管防冻作用。

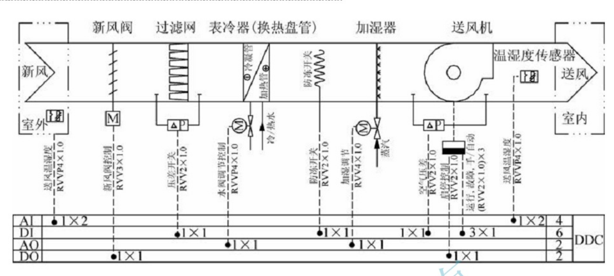


图 4.20 新风机组的监控原理

2）过滤网状态显示与报警

为监视过滤网的畅通情况，在滤网两端装设压差开关。当滤网发生阻塞时滤网两端的压差就会增大，压差开关动作发出报警，提醒工作人员进行清洗。

当风机在运行时，由于过滤网的阻力作用，在过滤网的前后存在一个压差。这一压差可以利用微压差开关监视。如果过滤网干净，压差将小于指定值。反之，如果过滤网太脏，过滤网前后的压差变大。当超过压差设定值时，微压差开关的触点就会动作。微压差开关吸合时的临界压差值可以根据过滤网阻力的情况预先设定。微压差开关将检测得到的过滤网状态(干触点信号)通过两芯线缆(如 RVV2×1.0)连接到 DDC 控制器的 DI 通道。

特别提示

压差开关和压差传感器检测得到的信号分别是数字信号和模拟信号。所以，对 DDC 来说，分别对应于 DI 和 AI 通道。压差开关的成本远低于可以直接测出压差的压差传感器，并且比压差传感器可靠耐用。在本问题中一般不选择昂贵的可输出连续信号的微压差传感器。

3）送风温湿度的检测与控制

在新风机与其他分散空气处理设备(如风机盘管)组成的半集中式空调系统中，新风机组一般只保证送入足够的新风量、控制室内湿度和送风温度，而不管控制区域内的温度。控制区域内的温度由分散的空气处理设备进行控制。

在风机出口处设 4～20mA 电流输出的温、湿度变送器各一个，接至 DDC 的 2 路 AI 输入通道上，分别对空气的温度和相对湿度进行监测，以便了解机组是否将新风处理到所要求的状态，并以此控制盘管水阀和加湿器调节阀。

特别提示

温度、湿度传感器常常装配成一体，这在产品选型时应加以注意。

一般没有必要每台新风机组单独设置室外温湿度传感器，只需整栋建筑统一设置一个或几个即可。

4）换热盘管的热交换速度与送风温度的控制

换热盘管对经过滤后的新风进行热交换处理，DDC根据检测得到的送风温度来控制水阀的开度，调节热交换速度，从而控制热交换后新风的温度。

控制器根据送风温度与设定温度的差值，对水阀开度进行PID(或PI)调节。设定温度根据控制器的内部时钟确定，夏季和冬季设定值不同。DDC通过1路AO通道控制换热盘管的二通电动调节水阀的开度，从而调节换热器的换热量，以使送风温度达到设定值。

此外，热水盘管的水阀应与送风机联动，仅当送风机处于运行状态时，水阀进入自动调节状态；送风机停止后，水阀自动回到关闭位置，以免浪费冷冻水循环能源。

5）防冻保护控制

在北方地区，防止冬季盘管内水的冻结是十分必要的。防冻开关设在换热盘管下风向侧，可起到防冻保护作用。当温度低于设定值(一般设置为5℃)时，防冻开关动作，输出干触点信号，经两芯线缆(如RVV2×1.0)接入到DDC控制器的1路DI通道，DDC据此发出控制命令，停止风机转动，开大热水阀门、关闭新风阀门，使风温回升，并报警以检测故障。当温度升高，防冻开关恢复常态时，重新启动风机，打开新风阀，恢复正常工作。

特别提示

应该说明的是，防冻开关的设置只适于加热工况的地区。

防冻保护的另一种方法是，在换热器水盘管出口安装水温传感器，测量出口水温。这一方面供控制器用来确定是热水还是冷水，以自动进行工况转换；同时还可以在冬季用来监测热水供应情况，供防冻保护用。水温传感器可使用4～20 mA电流输出的温度变送器，接到DDC的AI通道上。当机组内温度过低时，为防止水盘管冻裂，应停止风机，关闭风阀，并将水阀全开，以尽可能增加盘管内与系统间水的对流，同时还可排除由于水阀堵塞或水阀误关闭造成的降温。

6）送风相对湿度控制

该案例采用干蒸汽加湿器进行加湿处理。湿度传感器检测到送风湿度实际值，与控制器设定的湿度比较，经PID计算后，输出相应的模拟信号(1路AO)，控制加湿电动调节阀的开度，使实测湿度达到设定湿度。

特别提示

如果加湿设备使用电加湿器，则DDC控制器可以采用双位控制的方式，输出数字信号(1 DO)控制电加湿器的启停(通电与断电)。当然DDC也可以采用PID控制规律，调节电加湿器的电功耗，进而控制加入空气的蒸汽量。

7）风机启停控制及运行状态显示

对风机的监控内容包括：风机启/停控制及状态监视、风机故障报警监视、风机的手/自动控制状态监视等。DDC 通过事先编制的启停控制程序，通过 1 路 DO 通道控制风机的启停。将风机电机主电路上交流接触器的辅助触点作为开关量输入(DI 信号)，输入 DDC 监测风机的运行状态；从手/自动开关取 1 路 DI 信号输送给 DDC，以检测手/自动状态；主电路上热继电器的辅助触点信号(1 路 DI 信号)，作为风机过载停机报警信号。

风机的状态监视一般有两种实现方式：一种是直接从风机电控箱接触器的辅助触点取信号；另一种是在风机两端加设压差开关，根据压差反馈判别风机状态。第一种方法虽然简单经济，但实际上只是监测风机电控箱的送电状态；而第二种方法可以准确地监视风机的实际运行状态。

8）安全和消防控制

只有风机确实启动，风速开关检测到风压后，温度控制程序才会工作。当火灾发生时，由消防联动控制系统发出控制信号，停止风机运行，并通过 1 路 DO 通道关闭新风阀。

9）联锁控制

启动顺序控制：启动新风机→开启新风机风阀→开启电动调节水阀→开启加湿电动调节阀。

停机顺序控制：关闭新风机→关闭加湿电动调节阀→关闭电动调节水阀→关闭新风机风阀。

4. BAS 监控原理图绘制及监控点位的统计

根据上述的分析，绘制新风机组监控原理图如图 4.20 所示。DDC 监控点位统计见表 4－3，四类点位合计：4AI、6DI、2AO、2DO。

表 4－3 新风机组监控点位统计

设备名称 Equipment	数量 Qty	数字量输出					模拟量输出					数字量输入									模拟量输入								
		DO					AO					DI									AI								
		启停控制	新风风门控制	加湿器控制	蝶阀开关控制	电加热启停	冷水阀控制	变频器控制	旁通阀控制	蒸汽阀控制	回风风门控制	运行状态	故障报警	手/自动开关	过滤器报警	风机压差开关	蝶阀开关状态	高低液位报警	超高液位报警	防霜冻报警	送风温度	送风湿度	室内温度	室内湿度	室外温度	室外湿度	二氧化碳浓度	回风温度	风管静压
新风机组	1	1	1				1			1		1	1	1	1	1				1	1	1			1	1			
合计		2					2					6									4								

5. 补充说明带变频控制的新风机组的控制

带变频控制的新风机组需设置室内空气品质传感器。室内空气品质通过空气品质传感器检测，主要是检测 CO_2 的浓度，占用 DDC 控制器的 1 路 AI 通道。DDC 控制器根据监测得到的 CO_2 浓度，通过改变变频器的频率来调节送风机的运转速度。

当室内空气品质满足设定值要求时，可以降低送风机频率以节约能源。但送风机应设有最小运行频率限制，以保证最小新风量。当室内空气品质不满足设定值要求时，应加大频率提高送风机转速增加新风量。从节能角度考虑，室内空气品质的控制一般希望在满足室内空气品质的前提下，将新风量控制在最小。与传统的固定新风量的控制方案相比，在保证室内空气品质不变的前提下，以 CO_2浓度作为指标的控制方案具有明显的节能效果。

4.3.3 风机盘管系统的控制

1. 风机盘管系统的监控功能

由于风机盘管是分散对回风进行处理，因此无论从监控内容还是设备功率上都比新风机组简单得多。BAS 对风机盘管的控制功能包括以下几方面。

(1) 室内温度测量。

(2) 冷、热水阀开关控制。

(3) 风机变速及启停控制。

风机盘管系统的 BAS 监控原理如图 4.21 所示。

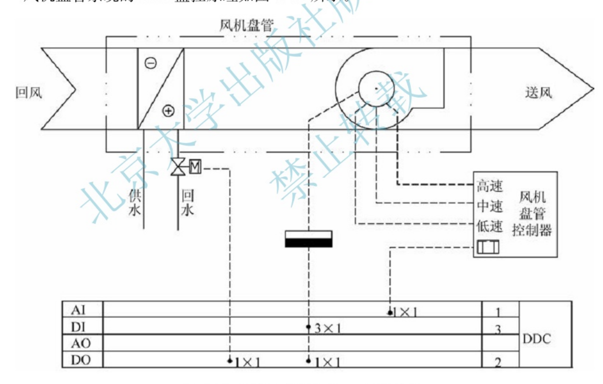


图 4.21 风机盘管系统的 BAS 监控原理

2. 风机盘管系统的监控功能描述

1) 风机变速及启停控制

回风由小功率风机吸入换热盘管，经热交换后送回室内。由于风机盘管的风机功率较小，因此控制较为简单，仅包括转速控制与状态监视，且一般为有级调节可分为高、中、低速 3 档。启停控制、风量调节通常是使用者就地手动控制。

2）室温控制

室温控制系统由室温控制器及电动阀组成，通过调节冷、热水量来改变盘管的供冷或供热量，控制室内温度。风机盘管温度采样直接取室内实际温度，温度传感器通常安装在温度控制器内。根据类型不同，风机盘管的温度控制器有启停控制、三挡风速控制、温度设定、室内温度显示、占用模式设定等功能可供选择。

风机盘管进行温控时，有双位控制和比例控制两种。前者特点是设备简单、投资少、控制方便可靠，但控制精度不高。后者控制精度较高，要求采用P(或PI)调节功能的温控器和连续调节的电动水阀，因此投资相对较大。目前大多数工程都采用双位控制方式，只有极少数要求较高的区域，或者风机盘管型号较大时，才采用比例控制。

无论是何种控制方式，温控器都应设于室内有代表性的区域或位置，不应靠近热源、灯光及远离人员活动的地点。三速开关则应设于方便人操作的地点。

3）联锁控制

风机启停应与电动水阀联锁。当房间设有钥匙开关时，从节能考虑，风机盘管应与钥匙开关联锁。

3. 风机盘管的联网控制与非联网控制

风机盘管的控制一般有联网和非联网两种实现方式。

1）非联网方式

所谓非联网方式，也就是就地控制的方式，是指盘管水阀控制、风机转速控制等功能不通过DDC控制器实现控制，而是由风机盘管温控器(由纯电子电路构成，内含感温元件，不含CPU)就地控制(详见后文的“知识链接”)。这种方式造价低廉，但控制方式不够灵活，无法实现集中监控管理，适合于控制要求不高的场合。

2）联网控制方式

风机盘管采用一些固化应用程序的小型DDC控制器如图4.22所示，对风机盘管进行一对一控制，并实现联网控制。联网控制方式可充分体现集中管理、分散控制的思想，但其造价较高。



(a) 550-863L



(b) 540-652

图4.22 西门子联网风机盘管控制器

另一种折中的控制方式是盘管水阀控制、风机转速控制等功能由温度控制面板中的纯电子电路就地实现，但风机的启停及运行状态等接入大型通用DDC控制器进行集中监控。这种方式的监控效果及造价都介于上述两种控制方式之间。



知识链接

风机盘管的就地控制

风机盘管实现就地控制的设备包括温度控制面板(也就是温控器)、电动开关阀等。如图 4.23 所示风机盘管室温控制装置，它主要由感温元件、室温双位调节器和小型电动三通阀构成。室温调节器根据感温元件检测到的温度控制水阀的通断，以达到调节室温的目的。实际应用中，感温元件和室温调节器做在一起，称为风机盘管温控器。温控器可装设于温度需要加以控制的场所内，温控器实物图及安装位置如图 4.24 所示。

感温元件
室温调节器
电动三通分流阀
风机盘器
A B C D E F
供水时：E—C—A—D—F
断水时：E—C—B—D—F
进水　出水

图 4.23　风机盘管室温控制装置

1.5m

(a)　(b)

图 4.24　温控器实物图及安装位置

如图 4.25 所示某典型的二管制风机盘管(单一冷水盘管)与温控器的电气接线图。温控器控制电动阀的通/断两个工作状态，使室内温度保持在所需的范围(温控器的设定温度在 10～30℃)。

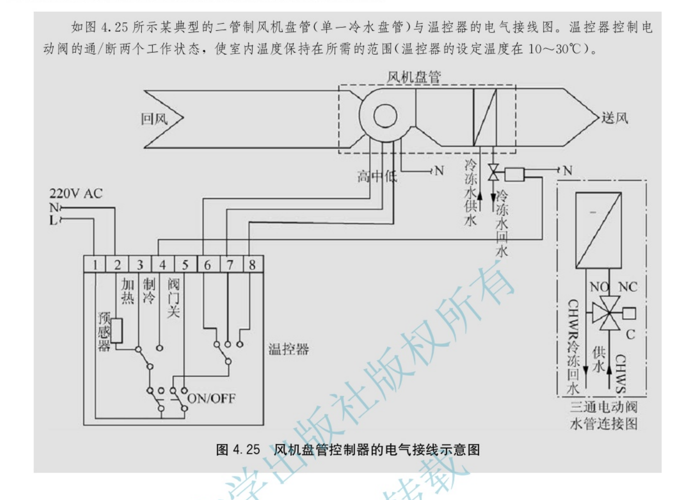


图 4.25　风机盘管控制器的电气接线示意图

4.4　集中式空调系统的控制

4.4.1　集中式空调系统简介

在集中式空调系统中，冷冻水(或空调热水)由冷(热)源站集中送至空调机房，对空气进行集中处理，然后经风管系统配送至各个房间。集中式空调系统的典型应用有由空调机组(Air Handling Unit，AHU)对大空间区域(如会议厅、餐厅、大堂等)空气集中处理的定风量系统，以及空调机组对独立分割空间(如办公区域等)空气集中处理的变风量系统等。

1. 空调机组

把各种空气处理设备、风机、消声装置、能量回收装置等分别做成箱式的单元，按空气处理过程的需要进行选择、组合而成的空调器称为空调机组(或组合式空调箱)。其标准分段主要有回风机段、混合段、预热段、过滤段、表冷段、喷水段、蒸汽加湿段、再热段、送风机段、能量回收段、消声器段和中间段等。分段越多，设计选配就越灵活。如图 4.26 所示组合式空调箱。在舒适性空调系统中最常用的是由混合段、过滤段、中间段、表冷段、送风机段五段组合而成的空调机组。

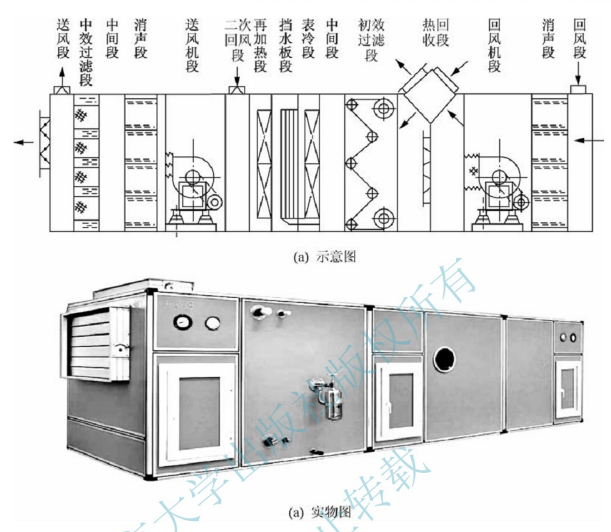


图 4.26 组合式空调箱

空调机组必须与相应的风管配送网络及末端设备配合才能组成完整的空调系统。根据末端设备的控制方式，可以将空调机组分为定风量(Constant Air Volume，CAV)系统与变风量(Variable Air Volume，VAV)系统两大类。

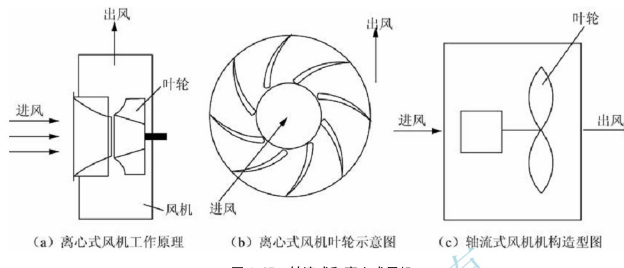
2. 空调风系统

空调风系统由送风机、回风机、风道系统、风口，以及风量调节阀、防火阀、排污阀、消声器、风机减振器等配件组成。其作用是将处理后的空气按设计要求送到空调房间，并从房间内抽回一部分空气或排除一定量的空气。

1) 通风机

通风机是机械通风和空调机组送风的主要设备，它能使空气增压，推动空气流动。常用的通风机有轴流式、离心式、斜流及混流式风机。

离心式风机，图 4.27(a)、(b)所示工作时，进风在叶轮旋转产生的离心力作用下，离开叶轮进入机壳，最后由机壳出口送出。与轴流式风机相比，它对进口空气的流场均匀度要求可以相对放宽一些。离心式风机具有风压高、风量可调、噪声较低、可将空气进行远距离输送等优点，适用于要求低噪声、高风压的场合。



（a）离心式风机工作原理　（b）离心式风机叶轮示意图　（c）轴流式风机机构造型图

图 4.27　轴流式和离心式风机

轴流式风机[图 4.27(c)]工作时，进风的气流方向与风机中心轴平行。轴流风机安装简单，直接与风管相连，占用空间较小，用途广泛。轴流式风机具有风压较低、风量较大、噪声相对较大、耗电少、便于维修等特点。

斜流及混流式风机通过改变叶片形状，使气流在进入风机后，既有部分轴流作用，又产生部分离心作用，提供中风压和中等风量。因此，这两种风机的安装与轴流式风机相似，接管方便，占用空间较小，性能介于轴流式风机和离心式风机之间。

特别提示

工程上，推动叶轮运转的电动机多采用三相异步电动机。BAS 对风机的监控原理与给排水系统中水泵的监控类似。

2）风管

普通空调多用薄钢板、铝合金板、镀锌钢板、玻璃纤维板或预制保温板(两层金属板间加隔热材料)制作风道。某些体育馆、影剧院也用砖或混凝土预制风道。风管有圆形、矩形和椭圆形等形式。矩形风管容易和建筑配合，但保温加工较困难。圆形风管阻力小，省材料，保温加工方便。椭圆形风管兼有矩形和圆形风管的优点，但需专用设备进行加工，造价较高。

减少管道的能量损失，防止管道表面产生结露现象，保证进入空调房间的空气参数达到规定值，应有风管保温措施。常用的保温结构由防腐层、保温层、防潮层、保护层组成。防腐层一般为 1～2 道防腐漆。保温层常采用阻燃性聚苯乙烯或玻璃纤维板或者新型的高倍率独立气泡聚乙烯泡沫塑料板，其厚度应参阅有关手册计算确定。保温层和防潮层都要用铁丝或箍带捆扎，然后再敷设保护层。保护层可用水泥、玻璃纤维布、木板或胶合板包裹后捆扎。设置风管及制作保温层时应注意外表美观和光滑，尽量避免露天敷设和太阳直晒。

3）送风口、回风口

常用的几种送风口如图 4.28 所示，主要有侧送风口、散流器、孔板送风口、喷射式送风口等型式，其作用是将送风状态的空气均匀地送入空调房间。

侧送风口安装在空调房间侧墙或风道侧面上，可横向送风，有格栅风口、百叶风口、条缝风口等类型。散流器安装在顶棚上，其送风气流从风口向四周呈辐射状送出。孔板送风口是开有一些圆形小孔的孔板，适用于要求工作区气流均匀、流速小、区域温差小和洁净度较高的场合，如高精度恒温室和平行流洁净室。喷射式送风口是一个渐缩的圆锥台形短管，渐缩角很小，风口无叶片阻挡，噪声小、紊流系数小、射程长，适用于大空间公共建筑的送风，如体育馆、影剧院等场合。

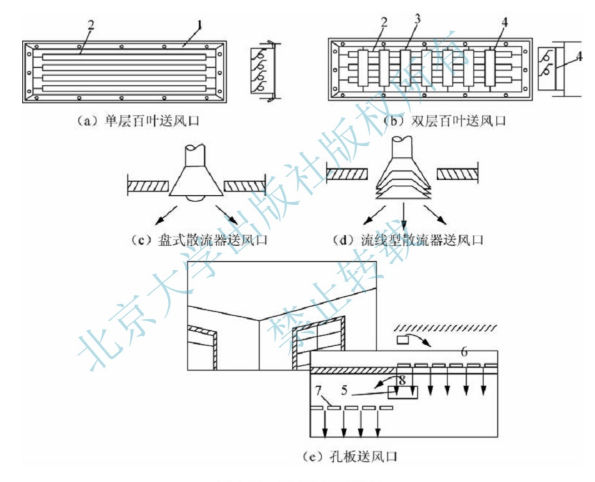


图 4.28 常用的几种送风口

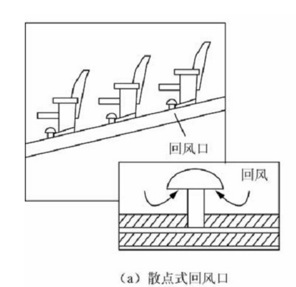
1—铝框；2—水平百叶片；3—百叶片轴；4—垂直百叶片；

5—风管；6—静压箱；7—孔板；8—空调房间

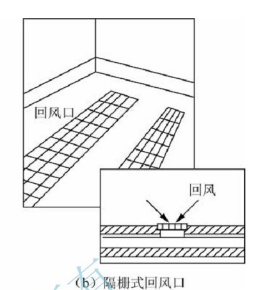
回风口由于汇流速度衰减很快、作用范围小，故其吸风速度的大小对室内气流组织的影响很小。回风口的类型较少，常用的有格栅、单层百叶、金属网格等形式，但要求能调节风量和定型生产。回风口的结构如图 4.29 所示。

3. 集中式空调的典型工作流程简介

为经济和节能，集中式空调常采用一定量的回风进行循环使用，这种系统即为回风式



(a) 散点式回风口



(b) 隔栅式回风口

图 4.29 回风口的结构

空调系统。根据回风的次数，可分为一次回风式空调系统和二次回风式空调系统。

1）一次回风式空调系统流程分析

一次回风式空调系统的结构与流程如图 4.30 所示。在表面式冷却器前同新风进行混合的空调房间回风叫第一次回风，具有第一次回风的空调系统称为一次回风式空调系统。此时，空调机组所处理的是由新风和循环空气(室内回风)混合的气体。一次回风系统在空调箱内设有一个新、回风混合室。新风量最小占总风量的10%，一次回风系统应用较为广泛，被大多数中央空调系统所采用。

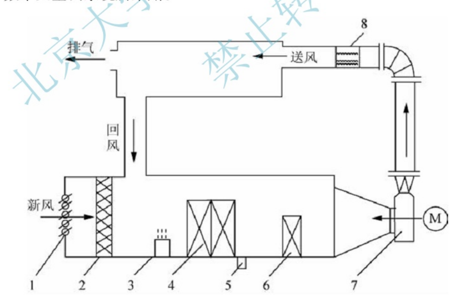


图 4.30 一次回风式空调系统的结构与流程

1—新风口；2—空气过滤器；3—电极式加湿器；4—表面式冷却器；
5—排水口；6—再加热器；7—风机；8—精加热器

若要深入理解空气处理过程，读者可以利用焓湿(*h*-*d*)图。下文的“知识链接”部分以图 4.30 的一次回风空调系统流程为例，利用焓湿图对空气处理过程进行分析。



一次回风空调系统的空气处理过程分析

1. 一次回风系统的夏季处理过程

室外空气状态为从 $W_x(h_{W_x}, d_{W_x})$ 的新风与来自空调房间状态为 $N_x(h_{N_x}, d_{N_x})$ 的回风混合后，状态为 $C_x(h_{C_x}, d_{C_x})$。进入表面式冷却器冷却去湿达到机器露点 L_x，然后经过再热器加热至所需的送风状态 $O_x(h_{O_x}, d_{O_x})$ 送入室内吸热、吸湿，当达到状态 $N_x(h_{N_x}, d_{N_x})$ 后部分排出室外，另一部分进入空气处理系统与室外新鲜空气混合，如此循环。整个处理过程可以写为：

$$\left.\begin{matrix}W_x\\N_x\end{matrix}\right\rangle\xrightarrow{\text{混合}} C_x \xrightarrow[\text{去湿}]{\text{冷却}} L_x \xrightarrow[\text{加热}]{\text{等湿}} O_x \xrightarrow{\varepsilon} N_x \xrightarrow{} \text{排出室外}$$

（N_x ↓ 回风）

上述处理过程在 h-d 图上的表示如图 4.31(a)所示。

一次回风式系统在表面式冷却器处理空气所需的冷量 Q_0 为：

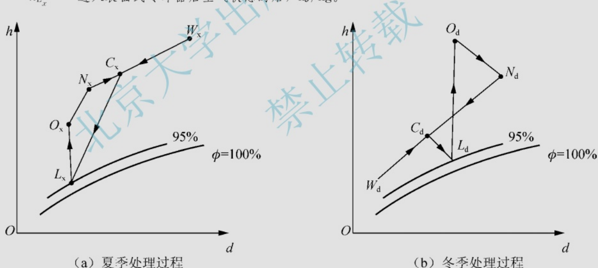
$$Q_0 = G(h_{C_x} - h_{L_x})$$

式中 Q_0——处理室所需冷量，kW；

G——系统送风量，kg/s；

h_{C_x}——混合后空气的焓，kJ/kg；

h_{L_x}——进入表面式冷却器后空气状态的焓，kJ/kg。



(a) 夏季处理过程　　(b) 冬季处理过程

图 4.31　一次回风式空调系统空气处理过程

2. 一次回风系统的冬季处理过程

从节能角度看，冬季送风量应小于夏季，但目前工程上采用的大多数空调系统，冬、夏季使用同一风机送风，也就是说冬、夏季的风量是相等的。空调系统的送风机是按满足夏季所需送风量确定的。

冬季室外空气状态为 $W_d(h_{W_d}, d_{W_d})$ 的新风与室内空气状态为 $N_d(h_{N_d}, d_{N_d})$ 的回风混合至状态 $C_d(h_{C_d}, d_{C_d})$，经加湿器绝热加湿到状态点 $L_d(h_{L_d}, d_{L_d})$，再经再热器加热至送风状态 $O_d(h_{O_d}, d_{O_d})$ 送入室内。在室内放热湿达到室内设计的空气状态点 $N_d(h_{N_d}, d_{N_d})$ 后，一部分被排出室外，另一部分进入空气处理系统与室外新风混合，如此循环。整个处理过程可以写为：

$$W_d,\ N_d \xrightarrow{\text{混合}} C_d \xrightarrow[\text{加湿}]{\text{绝热}} L_d \xrightarrow[\text{升温}]{\text{等湿}} O_d \xrightarrow{\varepsilon} N_d \longrightarrow \text{排出室外}$$

（N_d 处分出：回风）

上述空气处理过程在 h-d 图上的表示见图 4.31(b)，一次回风系统冬季所需的加热量为：

$$Q_1 = G(h_{O_d} - h_{L_d})$$

式中 Q_1——一次回风冬季系统所需热量，kW；

G——冬季送风量，kg/s；

H_{O_d}——冬季送风状态的焓，kJ/kg；

h_{L_d}——冬季处理过程中机器露点的焓，kJ/kg。

2）二次回风式空调系统流程分析

二次回风系统是在一次回风系统的基础上将室内回风分成两部分分别引入空调箱中，如图 4.32 所示。与经过喷水室或表面式冷却器处理之后的空气进行混合的空调房间回风称为第二次回风。因此，二次回风式空调系统是包括第一次回风和第二次回风的空调系统。一部分回风在新、回风混合室第一次混合，另一部分进入第二混合室与一次混合室出来后经过处理的气体第二次混合。

在分析一次回风系统的夏季处理过程时，我们可以看到这样一种情况：一方面将状态为 C_x 的混合空气冷却降温至机器露点状态 L_x；另一方面又要用再热器将 L_x 状态的空气升温至送风状态 O_x，方能送入空调房间。这种先冷却再加热的处理方法造成了能量浪费，既不经济也不合理，特别是在夏季，还要为系统提供蒸汽或用电加热器加热。而二次回风系统，采用喷水室后的第二次回风代替再热器，克服了一次回风系统的缺点，节约了冷量和热量，其基本构成如图 4.32 所示。

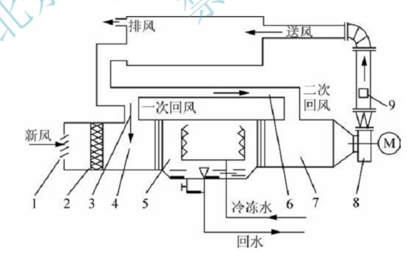


图 4.32　二次回风式空调系统流程图

1—新风口；2—过滤器；3—一次回风管；4—一次混合室；5—喷水室；
6—二次回风管；7—二次混合室；8—风机；9—电加热器

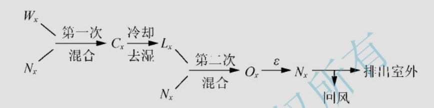


二次回风空调系统的空气处理过程分析

下面如图4.33所示作为分析对象，利用焓湿图进行空气处理过程分析。

1. 二次回风系统的夏季空气处理过程

夏季室外空气状态为$W_x(h_{W_x}, d_{W_x})$的新风与室内空气状态为$N_x(h_{N_x}, d_{N_x})$的第一次回风混合至状态$C_x(h_{C_x}, d_{C_x})$，进入喷水室冷却除湿后到机器露点状态$L_x(h_{L_x}, d_{L_x})$、然后再与状态为$N_x(h_{N_x}, d_{N_x})$的第二次回风混合至送风状态$O_x(h_{O_x}, d_{O_x})$并送入空调房间吸热吸湿，当达到状态$N_x(h_{N_x}, d_{N_x})$后部分排出室外，另一部分进入空气处理系统进行混合，如此循环。整个处理过程可以写为：



上述处理过程在h-d图上如图4.33(a)所示。

二次回风式系统在喷水室内处理空气所需的冷量Q_0为：

$$Q_0 = G_1(h_{C_x} - h_{L_x})$$

式中　Q_0——处理室所需冷量，kW；

G_1——新风与第一次回风的总风量，kg/s；

h_{C_x}——混合后空气的焓，kJ/kg；

h_{L_x}——喷水室后空气的焓，kJ/kg。

比较二次回风系统与一次回风系统后可以看出：

(1) 二次回风系统通过喷水室的风量G_1小于一次回风系统的总送风量G，这说明二次回风系统不仅节省了再热器的加热量，也节省了一部分冷量，喷水室的尺寸也可缩小。

(2) 由于二次回风系统的机器露点温度t_{L_x}低于一次回风系统的机器露点温度，而且第一次混合状态点C_x的焓值要比一次回风系统的h_{C_x}大一些，所以二次回风系统的冷冻机制冷效率将会有所降低，也使天然冷源的使用受到限制。

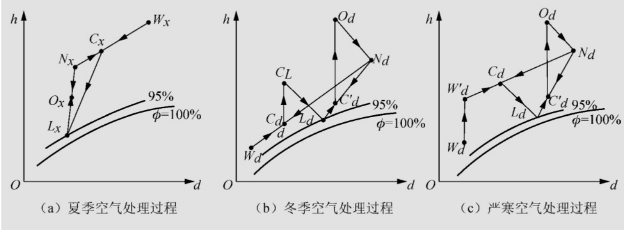


图4.33　二次回风式空调系统空气处理过程



2. 二次回风系统的冬季处理过程

如前所述，对一般系统而言，冬季送风量与夏季相同。在冬季较寒冷的地区，室外新风与回风按最小新风比混合后，其焓值仍低于送风所需的机器露点的焓值，此时就要用预热器加热第一次混合后的空气，使其焓值等于 h_{Ld}，再送至喷水室绝热加湿，最后与第二次回风混合再加热至送风状态 O_d 送入空调房间。整个处理过程可以写为：

$$\left.\begin{matrix}W_d\\N_d\end{matrix}\right\}\xrightarrow[\text{混合}]{\text{第一次}}C_d\xrightarrow{\text{加热}}C_L\xrightarrow[\text{加湿}]{\text{绝热}}\left.\begin{matrix}L_d\\N_d\end{matrix}\right\}\xrightarrow[\text{混合}]{\text{第二次}}C'_d\xrightarrow{\text{再热}}O_d\xrightarrow{\varepsilon}N_d\rightarrow\text{排出室外}\ (\downarrow\text{回风})$$

上述过程可在 h-d 图上如图 4.33(b)所示。

预热器的加热量 Q_1 为：

$$Q_1=G_1(h_{L_d}-h_{C_d})$$

再热器的加热量 Q_2 为：

$$Q_2=G_1(h_{O_d}-h_{C_d})$$

如果在严寒地区，就需要采用先加热新风再与第一次回风混合的系统。这种方法的送风状态 O_d、机器露点状态 L_d 与上面相同，不同之处在于预热器的位置和它的加热量。被预热后的新风 W'_d 与第一次回风混合后的焓值 h_{C_d} 应等于机器露点状态的焓值 h_{L_d}。这种方案的空气处理过程如图 4.33(c)所示，可以写为：

$$W_d\xrightarrow{\text{预热}}\left.\begin{matrix}W'_d\\N_d\end{matrix}\right\}\xrightarrow[\text{混合}]{\text{第一次}}C_d\xrightarrow[\text{加湿}]{\text{绝热}}\left.\begin{matrix}L_d\\N_d\end{matrix}\right\}\xrightarrow[\text{混合}]{\text{第二次}}C'_d\xrightarrow{\text{再热}}O_d\xrightarrow{\varepsilon}N_d\rightarrow\text{排出室外}\ (\downarrow\text{回风})$$

预热器的加热量 Q_1 为：

$$Q_1=G_W(h_{W'_d}-h_{W_d})$$

再热器的加热量 Q_2 为：

$$Q_2=G(h_{O_d}-h_{C'_d})$$

式中 G_W——新风风量，kg/s。

3. 关于一次回风系统和二次回风系统的选择

从夏季工况来看，二次回风系统比一次回风系统节省能量，尤其可以不用热源。但是二次回风系统机器露点温度较低，影响它在某些场合的应用。二次回风系统在空气处理设备构造和运行调节方面较一次回风系统复杂一些。对于夏季只作降温用的空调系统，如果对送风温差没有限制，即不必采用再热器或二次风来保证送风温差，这时采用一次回风系统就更合理。

4.4.2 全空气处理系统的监控功能

空调机组(AHU)即为全空气空调系统。从控制的角度看，空调机组与新风机组相比，有一些不同。空调机组控制调节的对象是房间内的温湿度，而新风机组控制的是送风温湿度。空调机组有回风(不同于新风机组系统)，新回风比可以变化。空调机组要求房间的温

湿度全年均处于舒适区范围内，同时还要研究系统节能的控制方法。因此，在过渡季节空调机组应尽量利用新风，以减少运行费用，降低运行成本。

BAS对空调机组的监控内容与功能可参照表4-4进行确定。在实际工程中，一般根据智能建筑的不同等级、投资、业主需求和相关标准确定BAS的监控功能，可以是表4-4中的全部或部分的监控功能。

表4-4 全空气处理系统的监控功能

序号	监控内容	监控功能
1	新风门控制	参数测量及自动显示、历史数据记录及定时打印、故障报警
2	过滤器堵塞报警	空气过滤器两端压差大于设定值时报警，提示清扫
3	防冻保护	加热器盘管处设置温控开关，当温度过低时开启热水阀，防止将加热器冻坏
4	回风温度自动检测	参数测量及自动显示、历史数据记录及定时打印、故障报警
5	回风温度自动调节	冬季自动调节热水开度，夏季自动调节冷水开度，保持回风温度为设定值。过渡季根据新风的温湿度自动计算焓值，进行焓值调节
6	回风湿度自动检测	参数测量及自动显示、历史数据记录及定时打印、故障报警
7	回风湿度自动调节	自动控制加湿阀开断，保持回风湿度为设定值
8	风机两端压差	风机启动后两端压差应大于设定值，否则及时报警与停机保护
9	机组预定时启停控制	根据事先工作及节假日作息时间表，定时启停机组
10	工作时间统计	自动统计机组工作时间，提示定时维修
11	联锁控制	风机停止后，新回风风阀、电动调节阀、电磁阀自动关闭；送回风机组与消防系统的连动控制
12	重要场所的环境控制	在重要场所设温湿度测点，根据其温湿度，直接调节空调机组的冷热水阀，确保重要场所的温湿度值
13	最小新风量控制	在回风管内设置二氧化碳检测传感器，根据二氧化碳浓度自动调节新风阀，在满足二氧化碳浓度标准下使新风阀开度最小，可节能
14	新风温湿度自动检测	参数测量及自动显示，历史数据记录及定时打印，故障报警
15	送风温湿度自动检测	参数测量及自动显示，历史数据记录及定时打印，故障报警

4.4.3 定风量空调系统的控制

本小节如图4.34所示的空调机组工艺流程为控制对象，进行监控原理分析和配置设计。

1. 工艺流程分析

如图4.34所示将新、回风按一定比例进行混合，在空调机组内进行各项参数处理后，直接将处理好的空气送至空调房间内使用。再经回风机一部分排到室外，另一部分与新风混合，继续循环。图中的风机都为定速风机，故本例属于定风量系统。

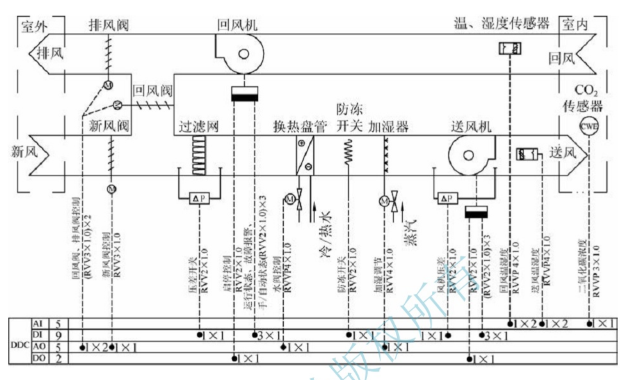


图 4.34 AHU 监控原理图

知识链接

定风量空调系统简介

如果各送风口不具备任何调节能力，送风机为定速风机，经空调机组处理后的空气直接由风管配送网络按比例送至各送风口，则各送风口的风量基本不变(忽略室内气压变化对送风量的影响)。工程中常把这种系统称为定风量空调系统。其特点是依靠送风温度的变化来调节房间的温度和湿度。

在会议厅、餐厅、大堂等大空间区域内，各送风口的控制范围内占用情况和温湿度设定值相同，可以由一台或多台空调机组统一控制，适宜采用定风量空调系统。在病房、仓库等独立、分割空调区域，温湿度设定值相同，也可采用定风量空调系统，但要在各区域的送风口末端安装开关风阀。当空调区域处于占用状态时打开开关风阀进行控制，当空调区域空闲时关闭开关风阀以节约能源。对于独立、分割的办公区域，定风量空调系统往往无法满足各区域的个性化需求。

定风量空调系统的设备是根据恶劣工况条件配置设计的。而全年空调的建筑物里，空调系统大部分时间都不在满负荷状态下工作，因此能耗较大。

2. 监控需求分析

(1) 电动风阀与送风机、回风机联锁控制，当送风机、回风机关闭时，电动风阀(新风、回风、排风风阀)都关闭。新风阀和排风阀动作同步，与回风阀动作相反。根据新风、回风以及送风焓值的比较，调节新风阀和回风阀开度。当风机启动时，新风阀打开；风机关闭时，新风阀同时关闭。

(2) 当过滤网两侧压差超过设定值时，压差开关送出过滤器堵塞信号，并报警。

(3) 当冬季温度太低时，防冻开关送出信号，风机和新风阀关闭，防止盘管冻裂。当防冻开关正常时，应重新启动风机，打开新风阀，恢复正常工作。

(4) 送风温度传感器检测到送风温度实际值，与控制器设定的温度比较，经 PID 计算后，输出相应的模拟信号，控制水阀的开度，使实测温度达到设定温度。

(5) 送风湿度传感器检测到送风湿度实际值，与控制器设定的湿度比较，经 PID 计算后，输出相应的模拟信号，控制加湿阀的开度，使实测湿度达到设定湿度。如果加湿设备使用加湿器，则控制变为数字信号，控制加湿器的启停。

(6) 风机的监测状态为：手/自动状态，运行状态和故障状态，由 DDC 内置程序控制风机启停。

(7) 送风机、回风机的启停顺序为：启动时先开送风机，延时后开回风机；停止运行时先关回风机，延时后关送风机。

空调机组的监控管理、联锁、防冻保护等与前面讨论的新风机组类似，因此，后文仅对新回风比控制、室内温湿度控制、室内空气状态确定等不同于新风机组的内容做深入分析。

3. 新回风比的控制模式

新回风比即为混合空气中新风与回风的比例。在空调机组中，为了调节新回风比，对新风、排风、回风 3 个风门都要进行单独的连续调节。根据质量守恒定理，通过新风门的空气流量与通过排风门的空气流量相等，因此控制时新风门开度与回风门开度之和保持为 100%，排风阀与回风阀的开度之和也为 100%。增大新风比例可以提高室内空气的品质和舒适度，而提高回风比例可以起到节能效果，因此在控制新风与回风比例时需要兼顾舒适度与节能两个因素进行综合考虑。在空气处理机工作时，一般不允许新风门全关，需要设定最小新风门开度，最小新风门开度一般为 10%～15%左右。对空调机组中的新风门和回风门的开度控制，工程中经常采用的控制策略有以下几种。

1) 节能优先控制模式

节能优先的控制思想是，只要换热盘管水阀没有处于关断状态，则将新风门开至最小开度以节约能源。具体实施时多根据工况和空气温度(当设有湿度传感器及加湿设备时应用焓值替代)进行判断。在过渡季节，盘管水阀处于关断状态，新风门全开。夏季工况，当室外温度大于回风温度时，盘管水阀必然打开，关闭新风门至最小开度；当室外温度小于等于回风温度时，盘管水阀关闭，新风门全开。冬季工况的判别逻辑与夏季工况相反。

2) PID 控制模式

通过回风温度与设定温度的差值对新风门开度进行 PID 控制。通过改变 PID 参数，可以调整此控制策略的节能、舒适倾向。

3) 有级控制模式

PID 控制模式虽然先进，但参数整定困难。另一种简便、直观的控制方式是将回风温度与设定温度的差值划分为若干区域，每个区域对应不同的新风门开度。如在夏季工况下，可采用如图 4.35 所示的控制逻辑。具体区域的划分及对应的新风门开度可根据实际工程情况加以确认。当仅区分回风温度大于或小于设定温度两个区域，且一个区域对应新风门全开，另一个区域对应新风门最小开度时，有级控制模式实际上就退化成节能优先控制模式了。

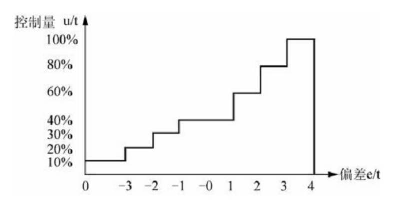


图 4.35　空调机组风门有级控制模式夏季工况

知识链接

排风中的能量回收

在空调系统中，由于加入了一定的新风量，故必须有一定量的排风。排风中具有可回收的冷(热)量，因此有些空调机组采用带转轮式热回收器来回收排风中的冷(热)量，转轮式热回收器如图 4.36 所示。转轮的转速对热回收效率影响很大，转轮转速一般在 4～10r/min 范围内，可以通过 DDC 控制其转速。

(a)　　(b)

图 4.36　转轮式热回收器

4. 室内温度、湿度的控制方法

空调机组不同于新风机组只需对送风温度进行控制，它控制的是相应空调区域的温度(室内温度)。一般可认为，回风温度为室内温度的平均值。

为提高控制精度和响应速度，空调机组的盘管水阀通常采用如图 4.37 所示的双闭环串级 PID 模型进行控制。如图 4.37 所示，首先根据设定温度与回风温度的差值通过 PID 算法确定理想的送风温度，然后再由理想送风温度与实际送风温度的差值确定盘管水阀开度。这种双 PID 的串级控制方法在控制精度与响应速度上都要优于由设定温度与回风温度的差值直接确定盘管水阀开度的单 PID 闭环控制。

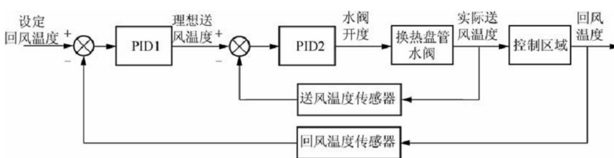
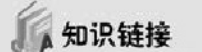


图 4.37 空调机组盘管水阀控制方式

对于室内湿度的控制也采用“串级 PID 调节”，方法类似，请读者自行分析。



串级控制简介

串级控制(Cascade Control)一般是在有多个测量信号和一个控制变量的情况下使用。它尤其适用于控制变量和过程变量之间存在显著动态特性(比如长的时间滞后或长的时间常数等)的系统中。比如，在空调机组调节室内温湿度的系统中，热湿交换过程的时间常数较大，达到十多分钟(甚至30min)以上。控制器要等到室内温湿度发生偏差后再进行控制。如果采用简单的PID控制系统，其控制很不及时，这会导致偏差在较长的时间内不能被克服，以致误差太大不符合工艺要求。

串级控制系统采用分级控制的思想，把时间常数较大的被控对象分解为两个时间常数较小的被控对象，也即把一个控制通道较长的对象分为两级。这种分级控制的思想在许多非工程、非自然学科领域应用也非常普遍。

串级控制系统将原被控对象分解为两个串联的被控对象，串级控制系统组成原理如图4.38所示。以连接分解后的两个被控对象的中间变量为副被控变量，构成一个简单控制系统，称为副控制系统或副环。以原对象的输出信号为主被控变量，即分解后的第二个被控对象的输出信号构成一个控制系统，称为主控制系统或主环。主控制系统中控制器的输出信号作为副控制系统控制器的设定值，副控制系统的输出信号作为主被控对象的输入信号。

以空调机组的室内温度 t_n 控制为例，空调机组的调节空气到送风温度 t_s 的设备可作为第一个被控对象，再到被控变量室内温度 t_n 的设备作为第二个对象，也就是在原被控制对象中找出一个中间变量 t_s。送风温度能提前反映扰动的作用，增加对这个中间变量的有效控制，使整个系统的被控制变量得到较精确地控制。如此构成的串级PID控制系统如图4.38所示。

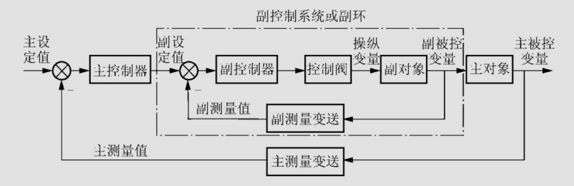


图 4.38 串级控制系统组成原理

串级控制在压力无关型VAV末端箱中也有应用，后文将详述。

5. 室内空气状态的确定方法

对于舒适性建筑，并非要求室内空气状态恒定于一点，而是允许在较大范围内浮动。例如温度为24～28℃，相对湿度在40%～65%以内，风速不大于0.3m/s，均满足舒适性要求。当室外状态偏低时，室内空气状态相应地靠近此域的下限；室外状态偏高时，室内空气状态则靠近此域的上限。当室外处于此域附近时，则尽可能多地用新风，使室内状态随外界空气状态变化。这样既可最大限度地节能，又可提高室内空气品质和舒适程度。这样，可以在每个时刻根据新回风状态及室内状态确定最适宜的送风状态，既保证房间空气状态处于舒适区，又使空气处理所需的能耗最小。当房间允许的舒适域范围较大时，与固定的室内设定状态相比，这样做节能效果十分显著。

4.4.4 变风量空调系统的控制

1. 变风量空调系统简介

变风量(VAV)空调系统是一种通过根据室内负荷变化改变送风量来调节室内温湿度的空调系统。VAV空调系统由变风量空气处理机组(带变速风机)、新风/排风/送风/回风管道、VAV末端装置(又称为变风量空调箱，VAV BOX)、房间温控器等组成如图4.39所示。其中，VAV末端装置是该系统的最重要部分，在每个控制区域都有一个VAV末端装置。VAV末端根据控制区域的热负荷，通过调节风门的开启比例控制送风量。变风量空调机组则根据各个VAV末端的需求，通过控制风机转速来调节总送风量。

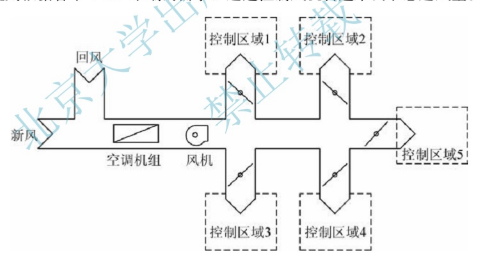


图4.39 VAV空调系统示意图

知识链接

VAV空调系统发展概况

VAV空调系统20世纪60年代起源于美国，70年代石油危机后在欧美、日本等国得到迅速发展。由于具有节能和可分区调节的优点，VAV空调系统在国内外建筑中得到越来越广泛的应用。目前，VAV空调系统已占据了欧、美、日集中空调系统约30%的市场份额，采用VAV技术的多层建筑与高层建筑已达到95%，并在世界上越来越多的国家得到应用。

VAV空调系统具有良好的舒适性。VAV空调系统可以根据建筑特点灵活分布，通过改变VAV末端风阀的开度可以控制送入各区域的风量，满足不同区域的个性化负荷需求。与新风机组加风机盘管系统相比，VAV空调系统属于全空气系统，避免了风机盘管的结露和霉变问题，且VAV末端具有隔离噪声作用，因此，舒适性更高。且因为VAV空调系统没有像风机盘管的冷凝水和霉变等问题，设备维护工作量较小。

节能是VAV空调系统的最大特点。建筑空调系统在全年空调运行时段的大部分时间里都不在满负荷状态下工作。VAV空调系统根据各控制区域的负荷需求决定总负荷输出，因而在部分负荷状态下送风能耗和冷热量损耗都相应减少。尤其在各控制区域负荷差别较大的情况下，节能效果尤为明显。

由于上述的舒适性和节能优点，VAV空调系统获得广泛应用，尤其在高档办公楼等应用场合。但是VAV空调系统一次性投资比较大，工艺设备加控制系统的总价大约是新风机组加风机盘管系统的两倍以上；并且系统控制相对复杂，对管理水平要求高，否则有可能产生新风不足、房间气流组织不好、房间正压或负压过大、室内噪声偏大、系统运行不稳定、节能效果不明显等一系列负面问题。

2. 变风量系统的控制特点

变风量系统在其舒适性和节能性方面具有定风量系统以及新风机组加风机盘管系统无法比拟的优势，但它的控制也相当复杂。

首先，由于变风量控制系统中任何一个末端风量的变化都会导致总风管压力的变化，如不能及时调整送风机转速和其他各风口风阀开度，其他各末端的风量都将受到干扰，发生变化。以图4.39为例，在夏季工况下，假设人为地将控制区域1内的设定温度调高，则控制区域1的VAV末端风阀开度必将减小。如其他设备运行状态不变，则风管静压必将升高，其他各控制区域的送风量加大，温度降低。即控制区域1的变化影响了其他区域的控制。如送风机运行频率及其他各末端的风阀进行相应调整，这些调整同样又会影响控制区域1。如何正确地处理各控制区域之间相互影响的问题是变风量系统控制的最大难点。

其次，变风量末端风阀的控制是以末端风速或送风量为依据的。在风量较小时，送风量的准确测量是变风量系统控制的又一问题。

再次，在定风量空调系统中，由于各末端的送风量基本保持恒定，因此只要保证送风量中新风的百分比就可保证最小新风量的送入。但是在变风量空调系统中，各末端的送风量是变化的，因此依靠百分比保证新风量的做法显然是行不通的。在许多变风量工程中，用户反映低负荷状态下空气品质不好往往就是由于这个原因造成的。当空调机组总送风量变化时，如何保证足够的新风量也是变风量控制需要解决的问题。

3. VAV末端及室内温度控制

变风量系统的空气处理机组的送风温度和湿度通常是定值或接近于定值。通过调节区域内的送风量来控制制冷量以实现与区域冷负荷的匹配。一台空调机组一般要担负多个控制区域的送风量。通常情况下每个区域都设一个VAV末端装置，连接在送风管上。该装置可以调节进入区域或房间的风量，使房间温度无论在供冷还是供热季节都能保持适当的温度。

通常要求 VAV 末端装置有以下功能：

(1) 接收控制器的指令，自动调节风量，使室温恒定。

(2) 应有“上限”和“下限”控制功能，即当送风量达到给定的最大值时，风量不再增加，送风量达到最小值时，不再进一步减小，以维持室内最小的换气量。

(3) 应有良好的分布特性，噪声小。

(4) 有通信功能，能向监控系统汇报风量末端的信息。

从压力角度来分，VAV 末端可以分为压力有关型和压力无关型。从动力形式来分，变风量箱可以分为诱导式和电动风机式。电动风机式变风量箱又包括并联式和串联式。

1) 压力有关型

在压力有关型 VAV 末端箱中，利用实测的房间温度值(T1)，温度控制器(TC-1)直接对风阀(D-1)进行控制，如图 4.40 所示。这种 VAV 末端没有风量变送器，即控制系统无法获得实际送风量这个重要参数，只能根据室内温度与设定温度的差值确定末端风门开度，是最简单的一种控制方式。

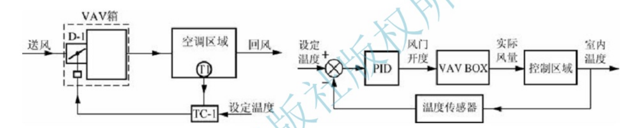


图 4.40 压力有关型 VAV 末端的工艺流程与控制方框图

TC-1—度控制器；D-1—VAV 箱的阀门；T1—室内温度传感器

当室内热负荷较低时，风门关闭；室内温度较高时，风门开大，而与实际的送风量无关。当系统内其他一些 VAV 末端箱改变阀门开度以调节风量所引起风管静压发生变化时，由于室内温度惯性较大，不可能发生突变，因此不会立刻影响风门的开度。风管静压变化了而风门开度不变，送风量必然发生改变。结果是，在负荷较大或较小的季节，离风机近的变风量箱获得了大部分的风量。另外，严重的过调或欠调现象非常明显，因为建筑系统的反应较慢，压力变化只有在房间温度受影响后才会被监测到。这种末端的送风量大小与风管静压有关，故称为压力有关型 VAV 末端。由于受风管静压的波动影响过大，目前已很少使用。

2) 压力无关型

压力无关型 VAV 末端增加了风量传感器，可以得到实际送风量，将此值与送风量设定值比较，通过风门调节送风量。而室内温度是起修订送风量设定值的作用，如夏天室内较冷时，减小送风量的设定点，室内变热，则增大送风量的设定值。

知识链接

毕托管风量传感器简介

VAV 末端箱的空气流量等于空气流速乘以风管的截面积。VAV 末端一般采用毕托管风量传感器，毕托管测出迎风面的空气全压和垂直于背风面的空气静压如图 4.41 所示，全压减去静压就是空气动压，空气动压开平方运算，即可由 VAV 专用控制器算出空气流速并根据此得出流量。



(a) 毕托管测量全压p_T和静压p_s工作原　(b) 一字型风量传感器　(c) 十字型风量传感器

图 4.41　毕托管风量传感器

空调工况下，空气可看成不可压缩的流体。根据伯努利定理可以得到空气流速 v_s 的计算式：

$$v_s=\sqrt{2(p_T-p_s)/\rho}=\sqrt{2p_v/\rho}$$

$$p_v=p_T-p_s$$

式中　v_s——空气流速，m/s；

p_v——空气动压(空气流动速度形成)，Pa；

p_T——空气全压，Pa；

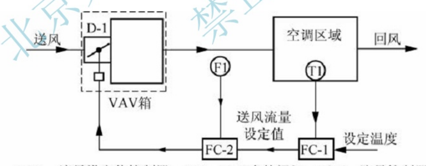
p_s——空气静压，Pa。

因为空气的密度 $\rho=1.293\text{kg/m}^3$，故有：

$$v_s=1.29\sqrt{(p_T-p_s)}=1.29\sqrt{p_v}$$

最低空气动压不要低于 2.5Pa(对应的风速 $v_s=1.29\sqrt{p_v}=1.29\sqrt{2.5}=2.04\text{m/s}$)，否则测量结果误差较大。因此，进入 VAV 末端箱的空调风风速要求不能低于 2.04m/s。

压力无关型 VAV 末端箱的工艺流程与控制方框图流程如图 4.42 所示。温度控制基于对流量设定值的重设，利用串级控制来消除送风压力变化对区域温度控制的影响。在变风



FC-1—流量设定值控制器；D-1—VAV盒的阀门；FC-1—流量控制器

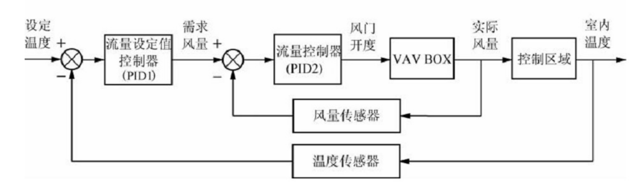


图 4.42　压力无关型 VAV 末端箱的工艺流程与控制方框图流程

量箱中，风阀(D-1)由流量控制器(FC-2)控制，FC-2 的设定值则由流量设定值控制器(FC-1)根据实测房间温度(T1)进行重设。这个设定值重设控制器根据由房间温度变化引起的冷负荷变化来确定流量的设定值。如果输送到 VAV 末端的静压有变化，风量将会受影响。且风量的变化将迅速地传给流量传感器。流量控制器根据风量传感器测得的数值 F1 调节风阀开度，以符合所需风量。最终，在房间温度受影响之前，控制系统就对压力波动做出了快速反应。这种末端的送风量不再受风管静压的影响，因此称之为压力无关型 VAV 末端。目前工程中大量采用的正是这种压力无关型 VAV 末端。

通常情况下，压力无关型装置独立使用或者与再热盘管一起使用。它用于当冷量减少需要额外加热时来再热空气。这些类型的变风量箱一般都有一个最小的送风量，如果一个特定区域在最小的送风量时仍过冷，就可以用再热盘管加热这一最小送风量，如图 4.43 所示。再热盘管可以使用电、热水或蒸汽。

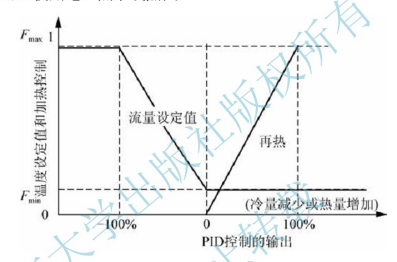


图 4.43　带再热末端的压力无关型 VAV 末端箱温度控制策略原理图

知识链接

VAV 末端箱按照有无风机分类

1. 基本型 VAV BOX

基本型 VAV 变风量箱是由进风管、风量传感器、风阀及箱体等组成的压力无关型末端装置。风量传感器一般为十字正交、多点采样、中央平均室式传感器，可感测空气全压和静压，并通过连接管分别引出全压和静压，测量其压差，就可以得到空气的平均动压，从而可计算出通过变风量末端装置的风量如图 4.44 所示。

2. 风机动力型 VAV BOX

在基本型 VAV BOX 中内置送风风机，如图 4.45(a)所示串联风机型，经过 VAV BOX 风阀的、由空调机组处理过的空气(称一次风)经过风机与室内(在顶棚内)的回风(称二次风)混合后送入房间。BOX 中风阀改变的是一次风，而风机的风量不变，所以一次风量减少时，二次风量增加，但总风量不变。增加风机和回风量仅是为了满足室内气流组织的需求，与室温控制基本无关。这时风机的转速还可以由室内人员，根据需要分“高、中、低”速控制(可改变吹风感)，而只要风机的风量大于一次风的风量，风机的控制就不会影响室温。

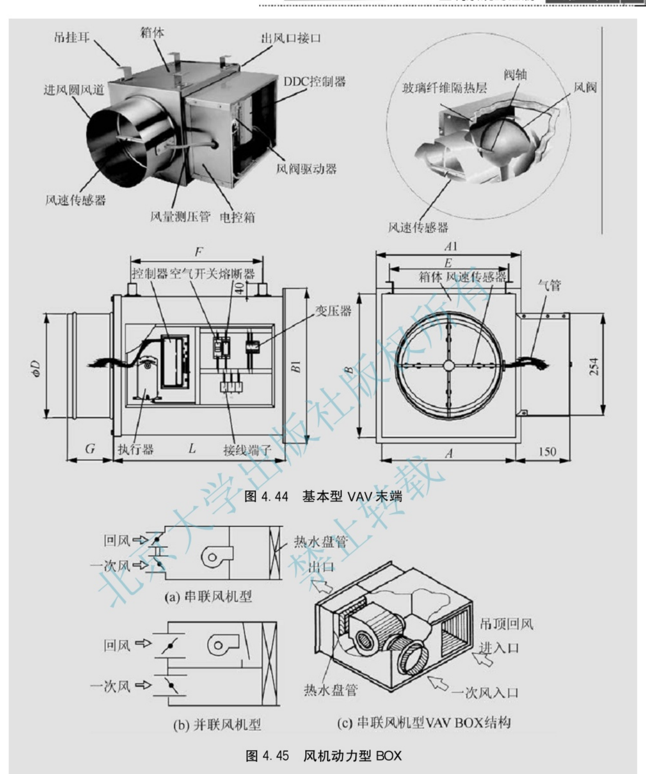


图 4.44　基本型 VAV 末端

图 4.45　风机动力型 BOX

在我国还流行着另一种基于变速风机的BOX，就是用变速器替代风阀来实现对风量的调节。如果采用近于“恒流量”特性的风机，当转速一定时，风量基本确定，而受主风道压力变化的影响很小。这样就可以直接根据室温闭环调节系统，调节风机转速来调节室温，因此就不必采用压力无关型BOX，不采用串级调节系统。这种系统虽然简化了，但需有变速风机。

在过渡季节的工况，有些房间需要供冷，而另一些房间需要供热。这时即使采用变风量系统，改变各房间的风量，仍不能同时满足各房间的冷热需求。为此，在BOX中需再设置加热器，通过调节

加热量来满足热负荷的需求。一般采用电加热器，这是考虑到过渡季节缺少热水热源的原因。另外，电加热控制简单，可采用双位控制，由 VAV 专用控制器完成。也有采用热水加热器的再热盘管，如图 4.46 所示带再热盘管、无风机的 VAV BOX。

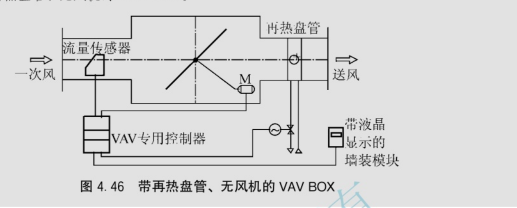


图 4.46　带再热盘管、无风机的 VAV BOX

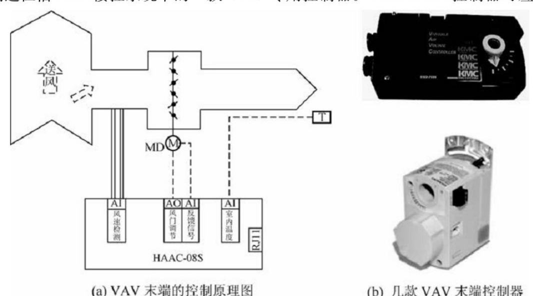
3）VAV 末端控制方式的实现

VAV 末端箱的控制部分由电子式温控器(或 DDC 控制器)、执行器、温度传感器、热水阀门控制器或电热控制器，以及用于与数字式温控器和执行器通信的数字网络、操作员终端、通信转接器等组成。这些产品可按设计或施工要求任意选用组合。

DDC 控制器可配合计算机操作管理，运行可靠，功能强大。通过数字接口，变风量空调系统的控制可成为楼宇自控系统的一部分。操作员可在操作终端上监视所有变风量装置运行和空调区域的空调效果，并可随时控制变风量空调系统的运行。

在楼宇自控工程中，常采用小型专用 DDC 控制器对 VAV 末端进行一对一控制。所有的风门、再热设备及末端风机控制等都由该小型 DDC 独立完成。由于由厂商预先固化应用程序，因此在确定 DDC 控制器时应首先根据 VAV 末端的实际情况和监控需求选定应用程序，然后确定 DDC 型号。

在图 4.47(a)所示的压力无关型 VAV 末端的控制应用中，所采用的 HAAC-08S 控制器是利达恒信 HBS 楼控系统中的一款 VAV 专用控制器。HAAC-08S 控制器可应用于各



(a) VAV 末端的控制原理图　　(b) 几款 VAV 末端控制器

图 4.47　VAV 末端的控制

种 HVAC 系统中的 VAV 末端箱，并且捆绑了风门执行机构。HAAC-08S 控制器提供压力无关型的变风量循环控制。

一些厂商还提供了专门的一体化的 VAV 控制器[图 4.47(b)]，这种控制器将 DDC 与风门驱动器进行一体化生产，以方便工程安装和维护。

4. 风管静压控制

当各 VAV 末端风门开度随控制区域负荷的变化而改变时，如果送风机运行频率不作相应调整，风管静压就会产生波动。工程中必须根据各末端状态及时调整送风机频率以优化控制。目前，应用较多的风管静压控制策略主要有定静压、变静压和总风量三种。

1) 定静压控制

定静压控制是一种传统的方法，系统比较简单。当 VAV 末端风门改变开度后，会影响整个风道的静压，风机通过改变风量以满足风道系统的静压要求。而风机变风量有三种方式：出口风阀的节流控制、入口导叶控制、变转速控制。其中以变转速控制最为常见，其节能效果也最为明显。

风管静压的控制点(静压测量点)一般放在主风道距风机出口的 2/3 处，定静压控制方式如图 4.48 所示。但是在风管管网比较复杂时，该点的位置仍然很难确定。有时会设置多个静压传感器，以各传感器测量值的加权和作为控制依据。

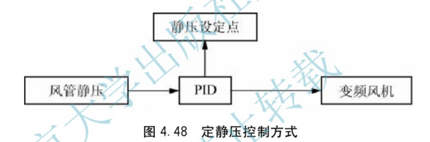


图 4.48 定静压控制方式

静压测量点难以确定，且节能效果不佳是定静压控制方式的主要缺陷。但定静压控制方式实施简单，各 VAV 末端之间的耦合性小。定静压控制较常见于欧美地区。

2) 变静压控制

与风机根据风道静压来维持送风静压恒定的定静压控制不同，变静压控制是根据压力无关型变风量末端的实际送风量(风门开度)送至风机转数控制器，控制送风机的转数，在保证处于最不利点处的送风量的前提下，尽量降低风道压力，从而降低风机转速，节约风机能耗。

变静压控制的节能效果良好，但由于各风门末端之间的耦合关系复杂，因此工程实施较定静压控制方式困难。尤其在各控制区域负荷均较低时，对于变静压这样的低风速系统，使用毕托管测量的送风量误差往往较大，直接影响控制效果。在日本，变静压末端风量的测量一般使用超声波风速传感器，以提高测量精度，但这将大大地提高工程成本。

变静压控制较常见于日本地区。目前国内许多新建高档办公楼都优先考虑采用变静压控制方式，但就已完工的项目而言，控制效果并不理想。许多项目中途又转为定静压控制。

3) 总风量控制

总风量控制是在变静压控制的基础上发展起来的方法。基本思路是，将各末端的风量

设定信号直接相加，得到当时的总风量需求值，这一值可作为调节风机转数的依据。

4）三种控制方式的工程实施及比较

工程中，许多人往往误认为采用哪种控制策略完全是控制方面的问题，而与暖通设计无关。事实上，每一种控制策略都必须和相应的暖通设计相配合，才能达到良好的控制效果。以定静压和变静压控制为例，定静压由于各 VAV 末端直接的耦合关系不明显，一般一台空调机组可以带 15～20 个末端，而变静压控制方式控制的空调机组一般只能带 5～8 个末端。因此，为定静压控制设计的 VAV 系统用变静压方式控制基本上是无法调试稳定的。

而为变静压控制设计的 VAV 系统如果采用定静压方式，就控制而言是没有问题的。但变静压系统的末端往往采用低风速系统，对 VAV 末端噪声参数要求不高，如果换成定静压控制的话，控制区域的室内噪声将明显增大。

由此可见，工程中 VAV 风管静压控制方式的确定应与暖通设计结合起来，最好从暖通设计早期就开始介入。

5. VAV 空调系统监控案例

变风量空调系统不仅要对 VAV BOX 进行控制，还要对空调机组进行监控。空调机组可为带有一次回风的空调机组，其监控内容有：送风机转速控制，回风机转速控制，送风温、湿度的控制以及送风机、回风机运行状态的监视与故障报警等。VAV 空调系统监控原理如图 4.49 所示。

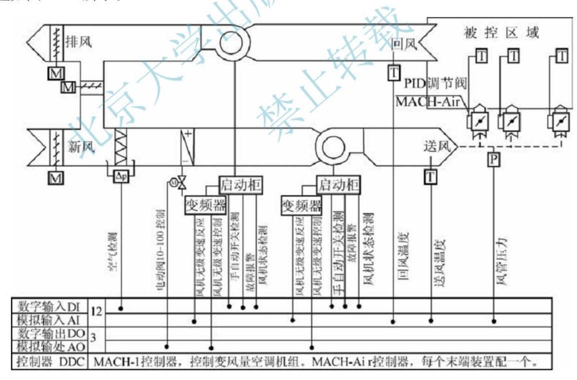


图 4.49　VAV 空调系统监控原理图

4.4.5　送排风系统的控制

送风的任务是把经过处理的空气输送到被调区域。排风的任务则是排出室内被污染的

空气，借以改善室内空气的条件，以利于人们的生活、工作和学习，保证人们的身心健康，提高工作效率。送排风系统的核心设备是送风机(Supply Fan，SF)和排风机(Exhaust Fan，EF)。送风机与排风机系统由于不对空气进行任何温、湿度处理，因此控制较为简单。其监控对象主要为送、排风风机的工作状态，监控内容包括：风机启/停控制及状态监视，风机故障报警监视，风机的手/自动控制状态监视等。

如图 4.50 所示送排风系统的监控原理。DDC 控制器通过事先编制的启停控制程序，通过 1 路 DO 通道控制风机的启停。将风机电机主电路上交流接触器的辅助触点作为开关量输入(DI 信号)，输入 DDC 监测风机的运行状态。从手/自动开关取 1 路 DI 信号输送给 DDC，以检测手/自动状态。主电路上热继电器的辅助触点信号(1 路 DI 信号)，作为风机过载停机报警信号。在风机两端加设压差开关，根据压差反馈以准确地监视风机的实际运行状态。空气品质传感器检测室内空气的 CO_2 浓度，作为 DDC 启停风机的判断依据。

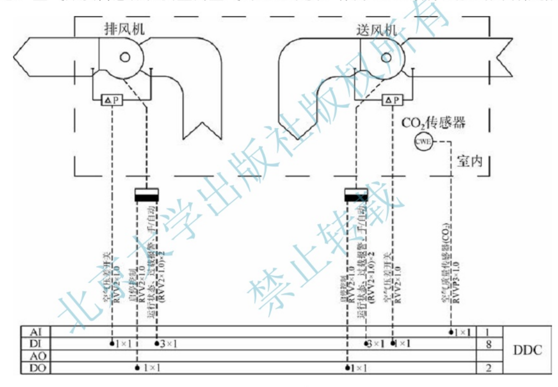


图 4.50 送排风系统的监控原理

如有需要还可以安装风速传感器，对送、排风量进行监测。另外，有些送风系统还需安装滤网对室外空气进行过滤，此时还需安装滤网压差传感器，对滤网阻塞情况进行监视。

工程中，消防排烟风机(Smoke Exhaust Fan，SEF)一般也归入送排风系统，它的启停一般由消防系统联动控制，楼宇自控系统只需对其运行及故障状态进行监视即可。

本 章 小 结

暖通空调(HVAC)是供暖、通风和空气调节系统的总称，是建筑设备自动化系统(BAS)最主要的控制对象。对 HVAC 的监控在建筑设备自动化系统(BAS)中占有十分重

要的地位。本章只涉及空气调节系统的内容，冷热源及空调水系统的控制将在下一章介绍。

本章首先介绍了空气调节的任务、热/湿负荷、空调系统的组成和分类、空气处理设备。这些知识是读懂和理解暖通空调专业技术资料的必备基础。接着分别就空调系统的半集中式空气调节系统、空气处理系统详细论述了其设备运行的知识和 BAS 监控原理。

对于半集中式空调系统的控制，主要分析了风机盘管加新风机组的形式。以一个工程的新风机组为案例，分析了新风阀控制、过滤网状态显示与报警、送风的温湿度检测、换热盘管的热交换速度，与温度控制、防冻保护控制、送风相对湿度控制、风机启停控制及运行状态显示、安全和消防控制、联锁控制等监控内容和原理，并据此绘制监控原理图和监控点统计表。此外还对 CO_2 浓度的控制进行了专门介绍。对于风机盘管，可通过 BAS 和专用控制器实现联网控制，也可通过就地模拟仪表实现就地控制。前者可实现集中管理、分散控制，但造价较高，后者造价低廉，但无法实现集中监控管理，适合于控制要求不高的场合。

对于集中式空调系统的控制，主要分析了定风量空调系统和变风量空调系统两种形式。分析了空调机组控制与新风机组控制的不同之处。空调机组控制调节的是房间内的温湿度，而新风机组控制的是送风温湿度；空调机组有回风，新回风比可以变化；空调机组要求房间的温湿度全年均处于舒适区范围内，同时还要研究系统节能的控制方法。以某工程的一次回风空调系统为案例，着重分析了空调机组的新回风比控制模式、室内温湿度的控制方法、室内空气状态的确定方法。对于变风量空调系统的控制，则着重分析了变风量空调系统的控制特点、VAV 末端箱的两种控制方式(压力有关型和压力无关型)的控制原理、风管静压控制等内容。此外还对送排风系统的控制做了简单介绍。

暖通空调设备的监控是读者学习本书的重点，读者有必要深入理解和掌握。



习 题

一、填空题

1. 暖通空调系统的耗电量占全楼总耗电量的__________%以上，其监控点数量常常占全楼 BAS 监控点总数的__________%以上。

2. 暖通空调的英文全称是__________，缩写为__________。

3. 空气调节是为了满足生活、生产要求，改善劳动卫生条件，用__________方法使室内环境空气参数保持在一定范围内的工程技术，它是一门环境控制技术。

4. 一般来说，空气调节主要是调节空气的四个参数，分别为：__________、__________、__________和__________。

5. 对于人们的居住空间，所调节的空气参数应以__________为目的；对于生产工艺所需的空气环境应以__________为空气调节的依据。

6. 对于空气的温度调节，一般来说，居室的温度夏季保持在__________，冬季保持在__________比较合适。对于工矿企业、科研、医药卫生单位则根据__________要求确定温度值。一般来说，室内的相对湿度冬季应保持在__________之间，夏季应保持在__________之间，这样人的感觉比较舒服。

7. 空气温度的调节过程实质上是增加或减少空气所具有的__________过程，对空气的湿度调节过程，实质上是增加或减少空气所具有的__________的过程。

8. 全水系统、空气-水系统、水源热泵系统、诱导器系统、风机盘管系统等均属__________，单风道空调系统、双风道空调系统及变风量空调系统均属__________。

9. __________是一种耗费能量最多的系统。

10. 集中式空调系统和半集中式空调系统两者的冷源、热源都是由__________供给。通常，集中式和半集中式空调系统又统称为__________。

11. 喷水室可用于夏季时对空气__________或冬季时对空气__________。

12. 在表面式加热器中通入热水或蒸汽，可以实现空气的__________过程；通入冷水或制冷剂，可以实现空气的__________或__________过程。

13. 用喷水室处理空气时，可能仅发生显热交换；也可能既有显热交换，又有__________交换。当喷出的水珠表面空气边界层的水蒸气分压低于周围空气的水蒸气分压时，则起到__________作用，反之，则起到__________作用。

14. 电加热器是使电流通过电阻丝发热来加热空气的设备。由于耗电费用较高，通常只用在__________的空调机组中。

15. 加湿器是用于进行空气加湿处理的设备，常用的有__________和__________两种类型。

16. 空气过滤器是对空气进行净化处理的设备，通常分为__________、__________和__________三种类型。

17. 空调系统中常用的除湿机是__________。

18. 民用建筑舒适性空调系统中最常用的是由__________、__________、__________、__________和__________五段组合成的空调机组。

19. 典型的半集中式空调是__________系统加上__________系统。

二、简答题

1. 空气调节的任务是什么？

2. 对空气流速调节的作用是什么？

3. 空气调节系统一般由哪些部分组成？

4. 舒适性空调和工艺性空调有什么区别？

5. 解释空调系统中有几个常用的术语：送风、排风、回风、新风。

6. 按风量调节方式不同，空调系统分为哪几类？

7. 根据空调系统使用的空气来源不同，空调系统分为哪几类？

8. 若对读者所在学校第一幢教学楼的教室配置中央空调系统，请采用简单计算法或者单位面积估算法估算该楼的夏季冷负荷。

9. 风机盘管空调系统是怎样实现调节室内温湿度的？

10. 风机盘管机组空调系统有哪些新风供给方式？

11. 绘制新风机组的组成示意图。

12. BAS是怎样实现对风机盘管系统的监控的？

13. 利用软件AutoCAD绘制图4.20“新风机组监控原理图”，并分析BAS监控点的设置原理。

14. 新风机组是怎样实现对室内空气品质控制的?

15. 在图 4.20 所示新风机组工艺流程中，若需要根据室内空气品质对送风机进行 BAS 监控，则请绘制该新风机组监控原理图。

16. 简述图 4.8、图 4.30、图 4.32 所示的直流式、一次回风式、二次回风式空调系统的工艺流程。并利用焓湿图分别分析空气处理过程。

17. 空气系统中的风系统的作用是什么?

18. 简述风口的作用及形式。

19. 简述图 4.34 所述的 AHU 系统的监控原理，并利用软件 AutoCAD 绘制工艺流程图。

20. 对空调机组中的新风门和回风门的开度控制，工程中经常采用哪些控制策略?

21. 简述空调机组的室内温湿度控制方法。

22. 如图 4.51 所示二次回风式空调系统的流程。

(1) 请说明其工作流程。

(2) 设计 BAS 监控点位，并且绘制监控原理图。

(3) 填写监控点位统计表。

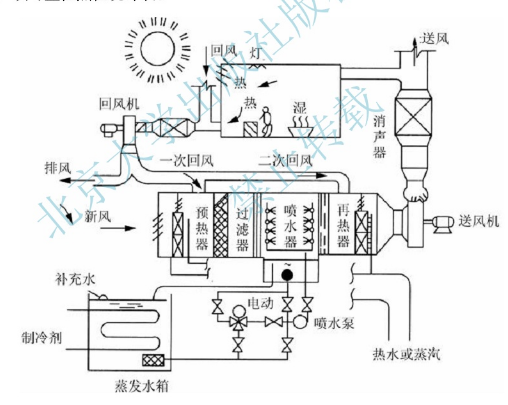


图 4.51　二次回风式空调系统的流程

23. CAV 和 VAV 分别指的是什么?

24. 简述 VAV 末端的两种控制方式。

25. 简述变风量空调机组的控制方式：定静压控制、变静压控制和总风量控制。

26. 某变风量空调系统平面图如图 4.52 所示(选自某品牌 VAV 末端的产品说明书)，请阅读分析其工艺流程。

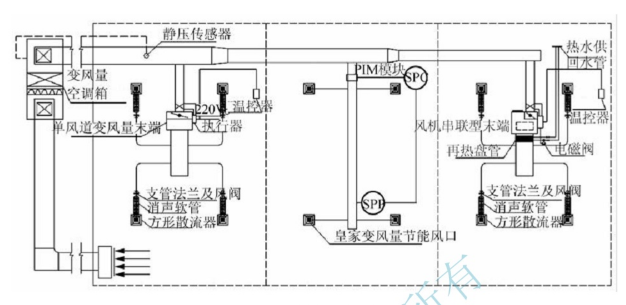


图 4.52 某变风量空调系统平面图

27. 根据图 4.50 所示“送排风系统的监控原理”，分析送排风系统监控原理，并填写监控点位统计表。

第5章

冷热源系统的控制

教学目标

通过学习了解冷热源设备的工艺流程的基本知识，具有看懂相关专业技术资料的能力。通过冷热源系统监控案例的学习，理解BAS对冷水机组、冷却水、冷冻水、锅炉、热交换系统的控制和优化原理，掌握相应的BAS点位设计的基本能力，具备监控原理图绘制、点位统计表编制和BAS设备配置的能力。

教学步骤

能力目标	知识要点	权重	自测分数
了解冷冻站的工艺流程	冷水机组的工作原理	5%	
	某冷冻站的运行流程分析	5%	
	冷冻站机电设备的启停顺序	5%	
理解冷冻站的控制原理，掌握冷冻站监控原理图设计	BAS对冷冻站的控制思路	5%	
	某冷冻站监控实例	10%	
理解BAS对水泵、风机等机电设备的控制原理，会设计二次回路图	电气控制原理	5%	
	二次回路图设计	5%	
理解冷水机组群控实现的策略和方法	冷水机组运行台数的确定	5%	
	冷水机组运行时间、启动次数记录	5%	
	群控的序列策略	5%	
理解空调冷冻水循环系统的控制原理，掌握监控原理图设计	冷冻水循环系统的基本知识	3%	
	一次泵冷冻水循环系统的控制	8%	
	二次泵冷冻水循环系统的控制	8%	

续表

能力目标	知识要点	权重	自测分数
理解空调冷却水循环系统的控制原理，掌握监控原理图设计	空调冷却水系统的基本知识	3%	
	冷却水系统控制原理	10%	
理解热源设备及热交换系统的控制原理，掌握监控原理图设计	热源设备的基本知识	3%	
	锅炉设备的控制	5%	
	热交换系统的控制	5%	

▶▶章节导读

现代建筑中，暖通空调系统的能耗占总能耗的一半以上，而冷热源设备又是暖通空调系统能耗的主要组成部分。冷热源设备不仅监控工艺复杂，而且节能技术手段丰富，对这些设备的控制质量优劣直接影响日后的设备运行经济效益。

第4章介绍了空调系统设备的控制原理，本章介绍的是冷热源和空调水系统设备的控制。本章主要内容包括：中央空调系统中冷水机组的工艺流程、主要能耗特性和基本控制方法，冷水机组群控实现的策略和方法，BAS对水泵、风机等机电设备的控制原理，冷却水系统优化控制、冷冻水供水温度优化，以及热源设备和热交换系统的控制原理。

引例

工程师Helloly最近在做一个酒店工程。该工程的冷冻站包括多台冷水机组、冷冻水泵、冷却水泵、冷却塔等设备。对这些设备，是采用冷水机组厂商自带的专业控制系统实现群控，还是由楼宇自控系统(BAS)统一做控制呢？到底是哪种方式更好些？造价上的差别会有多大？在机组招标时需要提出那些具体要求(比如控制点位的要求等)？Helloly对冷冻站的控制方式难以定夺。

一些有类似工程经验的同行朋友了解了Helloly的难处后，纷纷提出了自己的观点和参考建议。

工程师A的观点：

首先，不是所有的冷水机组厂家都有完善的控制系统实现群控的。机组厂家有的在做，但这也是属于自动控制专业，机组厂家内往往专有个研发或自控的部门做这个！如果由机组厂家做这个，只是对数据的采集能更专业一些，适合运行人员的管理，但对自动控制可能不是很专业。

我认为楼宇自控系统(BAS)统一做比较好，但需要设备厂家对通讯协议要敞开，签订购买设备时一定要签署“通讯协议要敞开”这一条，否则还会花钱！

早年，楼宇自控系统(BAS)对空调的控制，做得不是很好。经过这些年的发展，他们找空调专家配合出来的产品还是不错的。我用过，一些品牌的BAS做的也很专业！

要注意，在运行时一定找个专业的运行人员运行，保证自控的正常使用。

在造价上，机组厂家做群控要便宜一些，买设备可以送群控。约克和特灵(这些都是著名的空调、冷冻机厂商)我没有接触他的群控，但国内厂家我倒是接触几个，主要是为了更好的卖设备。若是由BAS来控制机组设备，因是买机组设备后，再另买BAS，这当然要更贵了。

机组招标时需要提出的具体要求有哪些呢？这是由使用方需要什么数据，花多少钱来决定的，以及你要达到什么样的使用功能来决定的。当然，还有个前提就是业主要有足够的资金。

工程师B的观点：

工程师A说得比较详细了。不过TRANE(特灵)在做机房集成(意思是机房打包)，施工队只要连接相应的水管即可。但这样会使施工队与设备厂家扯皮，互相沟通很重要，我最近一个项目就是，冷冻机房的控制由设备厂家统一完成。

不过，个人认为采用BAS实现冷冻机房控制比较好，因为BAS实现的是对整个机电工程的集成。

工程师C的观点：

严格来说，冷水机组厂家做比较好。这是因为机组厂家对冷冻机的性能比较了解，知道冷冻机运行在什么工况下效率最高。这点BA厂家可能不如这些设备厂家。

但是在实际工程中，不管是BAS还是冷机厂家做群控，很少有能够综合考虑机组运行控制与节能的。

工程师D的观点：

采用专业的楼宇自控公司是首选。在实际工程中，那些所谓冷机厂家做群控，无非是总包后再分包而已。只要系统深化设计完善了，其实根本无所谓谁的优劣。最根本的是你选用好的硬件和软件。在工程调试时，需要结合实际运行工况。这点倒是冷机设备商占优的。

工程师E的观点：

不管是机组厂商自带的控制系统，还是楼宇自控系统，其实现冷冻机房设备的自动控制都是为了减少人力资源成本。在冷冻机房，主机昂贵，设备众多，运行调试要花很多时间。但现实情况是，最后在使用中还是需要有人(且须是专业人员)在冷冻机房值班，而那些自动控制系统还是置之不用，甚至是已进入建筑运行期即废弃了。

但针对酒店来说，还用BAS为好。这是因为BAS功能强大，特别是对末端新风机组系统有完善的控制和监测功能，BAS也能用照明系统、给排水系统、电梯系统等应用。

工程师F的观点：

我接触过几个BAS工程，到后来因为管理的人不会用，都没用上。所以，建议在冷冻机房使用监测点，不要采用自动控制点，可留备用位置给以后扩展，这样费用也少了。当然，对一些工程甚至可以连监测点也不要，也就是把整个BAS对冷冻机房的控制都省略掉，这样可以节省更多的投资。

上面的观点使得工程师Helloly获得了自己的思路。根据该工程的实际情况，Helloly提出了自己的解决方案，获得了公司管理层的肯定。





案例小结

冷冻机房的控制属于冷热源系统控制的重要内容之一，在BAS工程中至关重要。本例中各位工程师对冷冻机房控制提出不同的方案。

有主张设备本身自带的控制系统来完成控制的。自带的控制系统有其专业性的优势，比如对制冷机的性能比较了解，对数据的采集能更专业一些。有主张由BAS系统来实施机组控制的。BAS系统可以更好地实现集成，但前提是厂家“通讯协议要敞开”。也有认为，在冷冻机房建议使用监测点，不要采用自动控制点。

这些观点，各有利弊。在BAS工程中，冷冻机房需要根据实际情况来确定控制方案。

5.1 冷冻站工艺流程的认知

5.1.1 中央空调系统冷源概述

中央空调在供冷时需要冷量的来源。冷源有两类：天然冷源和人工冷源。天然冷源一般是指深井水、山涧水等温度较低的水。这些温度较低的水可直接用水泵抽取供空调系统的喷水室、表冷器等空气处理设备使用，然后排放掉。天然冷源往往难以获得。在实际工程中，空调系统通常使用制冷设备以人工制取冷量，这就是人工冷源。空调系统在采用人工冷源制取的冷冻水或冷风来处理空气时，制冷机是系统中消耗能量最大的设备。

中央空调系统中的冷源常称为冷冻站，所在的房间称为冷冻机房。冷冻站一般包括如下三个部分：冷水机组(Chiller，如图5.1所示)、冷却水循环系统(Heat Rejection System)和冷冻水分配系统(Chilled Water Distribution System)。



(a) 水冷涡旋型冷水机组



(b) 满液式螺杆冷水机组

图5.1 某品牌冷水机组实物图

冷水机组的主要功能是为空调末端提供足够的具有所需温度的冷冻水流量。冷水机组以水为载冷剂，可进行远距离输送分配并可以满足多个用户的需要。冷水机组配备有较完

善的控制保护设备，运行安全。它具有结构紧凑、占地面积小、机组产品系列化、冷量可组合配套等优点，便于设计选型、施工安装和维修操作。

冷冻水分配系统则把冷冻水传输和分配到各末端用户，冷冻水将从各末端用户吸收的热量在冷水机组的蒸发器中通过热交换传递给制冷剂。制冷剂吸收的热量在冷凝器中通过热交换传递给冷却水，冷却水系统将冷却水吸收的热量排放到大气环境中。

在中央空调的制冷系统中，冷水机组通常有四种类型：往复式制冷机(Reciprocating Chillers)、旋转-螺杆式制冷机(Rotary－screw Chillers)、离心式制冷机(Centrifugal Chillers)和吸收式制冷机(Absorption Chillers)。其中前三种属于蒸汽压缩式制冷机，蒸汽压缩式制冷机组在空调系统中是应用最广泛的制冷设备。压缩式制冷以消耗电能作为补偿，通常以氟利昂或氨为制冷剂；吸收式制冷以消耗热能作为补偿，以水为制冷剂，溴化锂溶液为吸收剂，可以利用低位热能和高温冷却水。

此外，蓄冰制冷机组在中央空调中的应用也越来越多。其基本思想是让制冷设备在电网低负荷时(夜间)工作制冰，利用冰地融解热(335kJ/kg)进行蓄冷，将冷量储存在蓄冷器中，在用电负荷的高峰期(白天)向空调系统供冷。蓄冰制冷可以调节电网负荷，起到削峰填谷、缓和供电紧张的作用。

特别提示

冰蓄冷往往被错误地认为是一种节能手段，而事实上它所消耗的能源要较普通冷源更多，其主要作用是移峰填谷、平衡电网负荷。对业主或物业管理部门而言，冰蓄冷的获益点则在于充分利用峰谷电价差，节省能源费用。利用峰谷电差价机制，鼓励冰蓄冷技术应用，对国家电力事业具有重要意义。

5.1.2 冷水机组的工作原理

冷水机组实际上就是一个制冷系统。制冷系统是指通过外能量的加入，实现热量从温度较低的物体(或空间)转移到温度较高的物体(或空间)的能量转换系统。把制冷系统中的压缩机、冷凝器、蒸发器、节流阀等设备以及电气控制设备组装在一起，专门提供冷水的设备，即为冷水机组。

1. 蒸汽压缩式制冷系统工作原理

蒸汽压缩式制冷系统主要由压缩机、冷凝器、节流机构(如膨胀阀、毛细管等)、蒸发器等组成，如图 5.2 所示。制冷工质(即制冷剂，参见后文的知识链接)在蒸发器内吸收被冷却物体的热量并气化成蒸汽，压缩机不断地将产生的蒸汽从蒸发器中抽出，并进行压缩，经压缩后的高温、高压蒸汽排到冷凝器后向冷却介质(如水、空气等)放热冷凝成高压液体，再经节流阀降压后进入蒸发器，再次气化，吸收被冷却物体的热量，如此周而复始地循环。

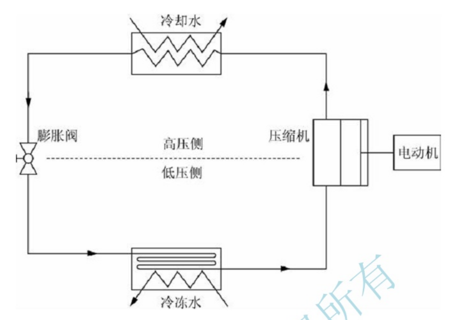


图 5.2　压缩式制冷系统示意图

特别提示

制冷系统也是可以用作制热的。蒸发器从外界吸收热量，则有制冷的作用；冷凝器向外界放热，则有制冷的效果。如图 5.3 所示制冷系统中增加一个四通换向阀，即可实现制冷状态[图 5.3(a)]与制热状态[图 5.3(b)]的切换。我们把以制热为目的的制冷系统称为热泵。家用热泵式空调器就是这样的工作原理。

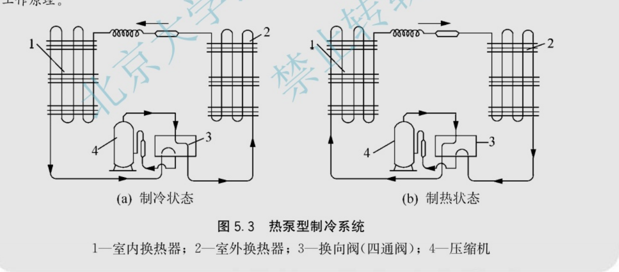


图 5.3　热泵型制冷系统

1—室内换热器；2—室外换热器；3—换向阀(四通阀)；4—压缩机

下面就压缩式制冷系统的四大部件做一介绍。读者若想进一步了解这四大部件对应的热力过程，则请参见后文的知识链接。

1）制冷压缩机

制冷压缩机的功能是压缩制冷剂蒸汽，迫使制冷剂在制冷系统中冷凝、膨胀、蒸发和压缩，周期性地不断循环，起到压缩和输送制冷剂的作用，并使制冷剂获得压缩功。制冷压缩机由压缩机和电动机两部分组成。

压缩机按制冷量分类，有小型压缩机(20×10^4 kJ/h 以下)、中型压缩机($20\times10^4\sim160\times10^4$ kJ/h)、大型压缩机(160×10^4 kJ/h 以上)。

压缩机按整体结构分类，有全封闭式、半封闭式、开启式压缩机。全封闭式压缩机主要用于电冰箱、空调器、冷藏箱等小型制冷设备。半封闭式压缩机的压缩机和电动机安装在一个铸件机身内，机身两端面和气缸盖(顶面)制成可拆卸式，检修较方便。开启式压缩机的压缩机和电动机分为两部分，其间用联轴器或用皮带传动连接。

压缩机根据工作原理不同，可分为容积式和离心式两种。容积式压缩机是靠工作腔容积改变实现吸气、压缩、排气等过程。活塞式压缩机、回转式压缩机、螺杆式压缩机均属于容积式压缩机。离心式压缩机是靠高速旋转的叶轮对蒸汽做功，使压力升高并完成输送蒸汽的任务。

螺杆式压缩机的构造如图 5.4 所示，工作原理如图 5.5 所示。在汽缸的吸气端座上有吸气口，当齿槽与吸气口相遇时，吸气开始。随着螺杆的旋转，齿槽脱离吸气口，一对齿槽空间吸满蒸汽。螺杆继续旋转，两螺杆的齿与齿槽相互啮合，由汽缸体、啮合的螺杆和排气端座做成的齿槽容器变小，而且位置向排气端移动，完成了对蒸汽压缩和传输的作

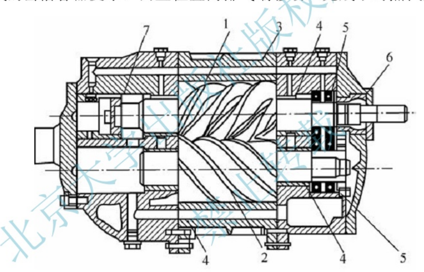


图 5.4　压缩机的构造

1—阳转子；2—阴转子；3—机体；4—滑动轴承；
5—止推轴承；6—轴封；7—平衡活塞

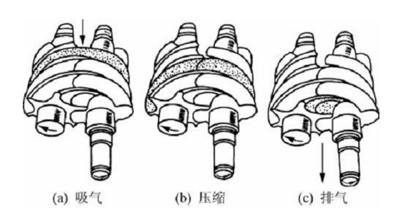


图 5.5　螺杆式压缩机的工作原理

用。当这对齿槽空间与端座的排气口相通时，压缩结束，蒸汽被排出。每对齿槽空间都经历了吸气、压缩、排气三个过程。螺杆式压缩机不设吸气、排气阀。当齿槽空间与吸气口接通时，即开始吸气；离开吸气口时，即开始压缩；与排气口相通时即开始排气，压缩过程结束。

2）冷凝器

冷凝器的作用是把压缩机排出的高温高压制冷剂蒸汽，通过散热冷凝为液体。制冷剂从蒸发器中吸收的热量和压缩机产生的热量，被冷凝器周围的冷却介质所吸收而排出系统。冷凝器在单位时间内排出的热量称为冷凝负荷。

冷凝器根据所使用冷却介质的不同可分为水冷式冷凝器、风冷式冷凝器等类型。风冷式冷凝器是利用常温的空气来冷却的。按空气在冷凝器盘管外侧流动的动力，可分为自然对流和强迫对流两种形式。自然对流式无风机噪声，传热效率低，仅适用于制冷量很小的家用冰箱等场合。强迫对流式一般装有轴流风机，传热效率高，不需水源，应用广泛。水冷式冷凝器用水冷却，其传热效率比风冷式高。中央空调系统中一般采用水冷式冷凝器。

冷凝器按结构形式不同，可分为套管式、壳管式、板式等类别。套管式冷凝器结构简单，易于制造，传热系数较高，可达1000W/(m^2·℃)，常用于制冷量小于40kW的小型氟利昂制冷系统中。壳管式冷凝器又分为立式和卧式两种。立式壳管式冷凝器主要用于氨制冷系统中，其结构庞大，耗材多。卧式壳管式冷凝器则在氨系统和氟利昂系统中应用广泛。卧式壳管式冷凝器传热系数较高，热负荷也大，多用于大、中型制冷系统。板式冷凝器采用的是板式换热器(常简称为板换)。板式换热器由若干板片组合而成，相邻板片的波纹方向相反，流体沿板间狭窄弯曲的通道流动，速度和方向不断发生突变，扰动强烈，从而大大强化了传热效果，是一种以波纹板为换热表面的高效、紧凑型换热器。中央空调的热力站也常采用板式换热器。

中央空调的冷水机组常采用卧式壳管式冷凝器。为节约用水，冷却水通常循环使用，需配备冷却塔、水泵及管路组成冷却水循环系统。冷却水进出冷凝器的温差一般为4～6℃。

3）蒸发器

蒸发器的作用是通过低温低压制冷剂液体在其内蒸发(沸腾)变为蒸汽，吸收被冷却物质的热量，使物质温度下降，达到人工制冷的目的。

蒸发器分为冷却液体(水)的蒸发器和冷却空气的蒸发器。在冷却空气的蒸发器中又能分为自然对流和强制对流两种形式。在中央空调系统中，一般以水作为载冷剂。水在蒸发器中被吸收热量，温度降低，然后送到大楼的空调末端。

4）节流机构

节流机构是蒸汽压缩式制冷系统的基本设备之一。节流机构的功能是将冷凝器输出的高压制冷剂冷凝液降压变为蒸发器所需的低压冷凝液(含少量蒸汽)，使制冷剂在低温下沸腾气化吸热制冷。将节流机构做成阀式，还可调节制冷剂的循环流量，从而实现制冷量的调节。节流机构的形式很多，常用的有毛细管、热力膨胀阀和电子膨胀阀等，如图5.6所示。



(a) 毛细管



(b) 热力膨胀阀



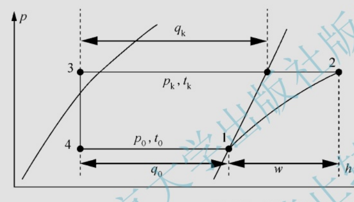
(c) 电子膨胀阀

图 5.6　节流机构实物图

知识链接

蒸汽压缩式制冷循环的热力过程分析

如图 5.7 所示，理想蒸汽压缩式制冷循环包括四个热力过程：绝热压缩(1—2)、等压冷凝(2—3)、等焓节流(3—4)和等压蒸发(4—1)。



q_0 ——单位质量制冷剂所吸收的热量（单位质量制冷量）；

q_k ——单位质量制冷剂在冷凝器中放出的热量（单位质量冷凝热）；

w ——单位质量绝热压缩功。

图 5.7　理论制冷循环示意图

1）绝热压缩过程

压缩机输入压缩功 w，制冷剂蒸汽压力由低压 p_0 升到高压 p_k，温度由低温 t_0 升到高温 t_k。压缩过程在瞬间完成，蒸汽与外界几乎不存在热量的交换，所以称为绝热压缩过程。该过程由于外界对制冷剂做功，使制冷剂温度升高而处于过热的蒸汽状态。

2）等压冷凝过程

过热蒸汽进入冷凝器，在压力不变的条件下，先是将部分热量传给外界冷却介质，冷却成饱和蒸汽，然后再等压等温下继续放出热量，冷凝成饱和液体。这是等压冷凝放热过程。向外界放出的冷凝热为 q_k。

3）等焓节流过程

饱和液体流经节流元件由高压 p_k 降至低压 p_0，温度由高温 t_k 降到低温 t_0，进入液、汽两相混合区。节流前后制冷剂的能量(焓)不变。这是等焓节流过程。

4）蒸发换热过程

制冷剂在蒸发器中沸腾蒸发，蒸发压力为 p_0，蒸发温度为 t_0，从被冷却物体中吸取所需要的汽化热。其蒸发温度 t_0 一定要低于被冷却物的温度。两相状态的制冷剂在蒸发器中吸收被冷却物的热量而不断气化，制冷剂在等压等温下向干度增大的方向变化，直到全部变为饱和蒸汽，又重新回到压缩机吸气口。这是等压蒸发吸热过程。从外界吸收的蒸发热为 t_0。

上述四个热力过程完成了一个完整的理论制冷循环。低压、低温制冷剂蒸汽再由压缩机抽吸、压缩，进入下一次循环。

在理论制冷循环过程中，压缩机起着压缩和输送制冷剂蒸汽，使制冷剂在蒸发器中产生低压低温、在冷凝器中产生高压高温的作用，是整个循环系统的心脏。节流元件起着节流降压和调节进入蒸发器的制冷剂流量的作用。制冷剂在蒸发器内蒸发，吸收被冷却物的热量，完成制取冷量。制冷剂从蒸发器中吸收的热量连同压缩机产生的热量在冷凝器中被冷却介质带走，使制冷剂不断从低温物体中吸热，向高温介质放热，从而达到制冷的目的。



制冷剂简介

制冷剂是制冷机进行能量转换的工作物质，它在密闭的制冷系统中循环流动，通过自身热力状态的变化与外界发生热能交换，从而实现制冷的目的。蒸汽压缩式制冷机中的制冷剂在低温下气化，从被冷却物中吸取热量，再在高温下凝结，向环境介质排放热量。

1. 制冷剂的分类、代号及其应用

国际上对制冷剂种类的代号和称谓有统一的规定。用字母“R”和它后面的一组数字或字母作为制冷剂的简写符号。字母“R”表示制冷剂。如“R12”表示氟利昂12制冷剂。

作为制冷剂使用的物体有很多。按照化学成分及组成的不同，制冷剂可以分成四类：无机化合物制冷剂、氟利昂制冷剂、碳氢化合物制冷剂、多元混合溶液。

常用的无机化合物制冷剂有氨(NH_3，R717)、二氧化碳(CO_2，R744)、水(H_2O，R718)等。这类制冷剂在工程上常用到的是氨，氨多用在大、中型冷库中。

氟利昂制冷剂是碳氢化合物中全部或部分氢元素被卤族元素代替后衍生物的总称。目前使用的大都是甲烷(CH_4，R50)和乙烷(C_2H_6，R170)的衍生物，如二氟二氯甲烷(CF_2Cl_2，R12)、二氟一氯甲烷(CHF_2Cl，R22)等。它们被广泛应用在电冰箱、冰柜和空调设备中。

碳氢化合物制冷剂主要用在石油和化工部门制取低温。如甲烷(CH_4，R50)、乙烷(C_2H_6，R170)、乙烯(C_2H_4，R1150)、丙烯(C_3H_6，R1270)等。

多元混合溶液又称混合制冷剂，是由两种或两种以上的氟利昂组成的混合物。混合制冷剂有共沸溶液和非共沸溶液之分。共沸溶液的特点是在固定压力下的蒸发温度或冷凝温度保持不变，且其气相和液相的组分保持不变，常见的共沸溶液有R500、R502等；非共沸溶液在固定压力下不能保持蒸发温度或冷凝温度恒定，且在饱和状态下气液两相的组成也不相同，常见的非共沸溶液有R407c、R410a等。

2. 常用制冷剂的主要特性

1) 氨

氨的汽化潜热大，工作压力适中，传热性能好，流动阻力小，吸水性强，几乎不溶于油。价格低廉，来源充足，是应用较为广泛的中温中压制冷剂。但氨有强烈的刺激性臭味，对铜及铜合金的腐蚀性强，空气中含氨量高时遇火会燃烧爆炸。因此，目前多在一些工业制冷设备的活塞式制冷压缩机中采用。

2) 氟利昂

氟利昂是用氟、氯、溴等部分或全部取代饱和碳氢化合物中的氢而生成新化合物的总称。氟利昂是制冷剂的一个大家族，具有化学性质稳定、不燃烧、无毒、对金属不腐蚀、易液化等优点。但氟利昂也有渗透性强、易泄漏、密度大、流动性差、价格高等缺点。由于氟利昂不溶于水，因此要求制冷系统保持干燥，如：规定R22、R12的含水量不超过0.0025%。目前，中、小型活塞式制冷压缩机、空调机用的螺杆式和离心式制冷机、低温制冷装置及一些特殊制冷装置几乎都采用氟利昂作制冷剂，可见其应用之广泛。

常用制冷剂的热物性参数可通过查阅相关制冷技术专业书籍获得。

3. 制冷剂的替换问题

研究证明，CFCs(即氟化碳，指不含氢的氟利昂)对大气中臭氧和地球高空的臭氧层有严重的破坏作用。CFCs还能在大气中稳定吸收太阳热，加剧温室效应。因此，减少和禁止CFCs的使用和生产，已成为国际社会环境保护的紧迫任务。

根据1987年通过的《关于消耗臭氧层物质蒙特利尔议定书》和其他有关国际协议，规定发达国家在1995年停止生产和禁止使用公害物质CFCs，在2030年停用过渡性物质CFCs，而对发展中国家允许延期10年再禁用。

2. 吸收式制冷系统工作原理

吸收式制冷与压缩式制冷一样，都是利用低压制冷剂的蒸发产生的汽化潜热进行制冷。两者的区别是：压缩式制冷以电为能源，而吸收式制冷则是以热为能源。在高层民用建筑空调制冷系统中，吸收式制冷所采用的制冷工质通常是溴化锂水溶液，其中水为制冷剂，溴化锂为吸收剂。因此，通常溴化锂制冷机组的蒸发温度不低于0℃，在这一点上，可以看出溴化锂制冷的适用范围不如压缩式制冷，但在高层民用建筑的空调系统中，由于要求空调冷水的温度通常为6～7℃，因此还是比较容易满足的。溴化锂吸收式制冷循环的基本原理如图5.8所示。

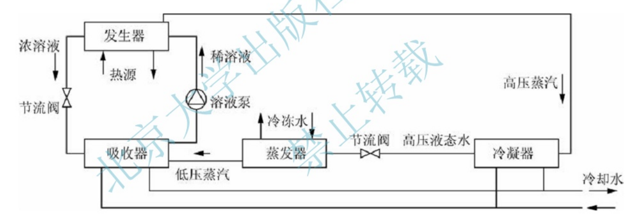


图5.8 溴化锂吸收式制冷循环的基本原理

来自发生器的高压蒸汽在冷凝器中被冷却为高压液态水，通过膨胀阀后成为低压蒸汽进入蒸发器。在蒸发器中，冷媒水与冷冻水进行热交换发生汽化，带走冷冻水的热量后成为低压冷媒蒸汽进入吸收器，被吸收器中的溴化锂溶液(又称浓溶液)吸收，吸收过程中产生的热量由送入吸收器中的冷却水带走。吸收后的溴化锂水溶液(又称稀溶液)由溶液泵送至发生器，通过与送入发生器中的热源(热水或蒸汽)进行热交换而使其中的水发生汽化，重新产生高压蒸汽。同时，由于溴化锂的蒸发温度较高，稀溶液汽化后，吸收剂则成为浓溶液重新回到吸收器中。在这一过程中，实际上包括了两个循环，即制冷剂(水)的循环和吸收剂(溴化锂溶液)的循环，只有这两个循环同时工作，才能保证整个制冷系统的正常运行。

从溴化锂制冷机组制冷循环中可以看出，它的用电设备主要是溶液泵，电量为5～10kW，这与压缩式冷水机组相比是微不足道的。与压缩式冷水机组相比，它只是在能源

的种类上不一样。前者消耗热能，后者消耗电能或机械能。因此，在建筑所在地的电力紧张而无法满足空调要求的前提下，作为采用低位能源的溴化锂吸收式冷水机组可以说是一种值得考虑的选择；如果当地的电力系统可以允许的话(当然，作为建设单位，还要考虑各地一些不同的能源政策)，还是应优先选择压缩式冷水机组的方案。

3. 制冷机的性能系数 *COP*

把制冷机作为一个系统，则输入该系统的能量包括压缩功 w 和蒸发吸热量 q_0，输出的能量为 q_k，如图 5.9 所示。以制冷机作为分析对象，应用热力学定律(参见后文的“知识链接”)可得：

$$q_0+w=q_k$$

能量利用的经济性常采用得到的收益与花费的代价的比值这一指标来衡量。在制冷循环中，把单位质量制冷量 q_0 与单位质量绝热压缩功 w 之比称为制冷机的性能系数(Coefficient of Performance，COP)，即：$COP=\frac{q_0}{w}=\frac{q_k-w}{w}$。*COP* 是针对空调设备节能的评价指标。显然，*COP* 越大，表明产生同等冷量所消耗的功越少，该设备设计制造的效果越好。制冷机的 *COP* 一般都大于 1，通常介于 2.5～7.0 之间。

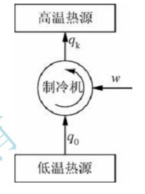


图 5.9 制冷循环的热力学原理图

如果考虑提高制冷机的 *COP*，冷凝温度应在允许范围内越低越好，而蒸发温度应在允许范围内越高越好。这样就可降低制冷剂在冷凝器和蒸发器中的压差，从而降低压缩机功耗。一般来说，在正常空调工况下，冷凝温度每降低 1℃ 或蒸发温度每升高 1℃，实际系统的 *COP* 能提高 1.5%～2.5%左右。当然，制冷机的运行对冷凝温度有最低要求。对于不同的制冷机设计，所要求的最低冷凝温度也不尽相同。蒸发温度应该越高越好，但是最高的蒸发温度也受系统的特定要求以及空调末端运行条件的限制。

制冷机的 *COP* 还与制冷量有关。这是因为制冷量的变化会引起压缩机工作负荷的变化，压缩机的效率也随之变化。一般来说，在相同蒸发温度和冷凝温度下，采用单级压缩机的制冷机在高负荷时的效率比在低负荷时要高。但离心式制冷机的效率随制冷量的变化有所不同。如图 5.10 所示一典型离心式制冷机 *COP* 随制冷量的变化情况，当制冷量约为 80%～85%时，其 *COP* 最高。

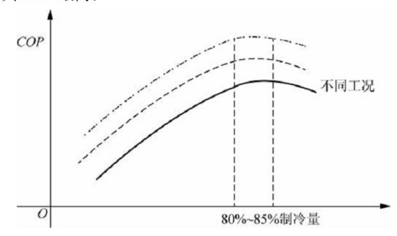


图 5.10 制冷机 *COP* 与制冷量之间的关系



制冷与空调系统中几个常用的定律

在制冷与空调系统的分析中，常用到能量守恒定律、质量守恒定律、热力学定律等。

1. 能量守恒定律

自然界的一切物质都具有能量，能量既不能创造也不能消灭，而只能从一种形式转换成另一种形式，从一个物体传递到另一个物体，在能量转换和传递过程中，能量的总量恒定不变。这就是能量守恒定律。例如，煤燃烧后放出热量，可以用来取暖；可以用来生产蒸汽，推动蒸汽机转换为机械能，推动汽轮发电机转变为电能。电能又可以通过电动机、电灯或其他用电器转换为机械能、光能或热能等。这些能量的形式在一定条件下发生多次转换，但能量的总量是恒定不变的。

2. 质量守恒定律

在任何的反应中，反应前后的质量总是守恒的。质量守恒定律是自然界普遍存在的基本定律之一。比如，对于某一个空调房间，质量守恒定律可表示为：

流进房间的空气质量－流出房间的空气质量＝空调房间内的空气质量的变化量

3. 热力学第一定律

飞机和火车的运行是以热机(喷气发动机内燃机)作为动力的。热机的作用是把燃料所产生的热能转化为机械功。制冷机的作用是借助消耗一定量的机械能，而获得一定的冷量。对热机，我们希望消耗尽量少的热能而获得尽可能多的机械功。而对制冷机，则希望消耗尽量少的机械能而获得尽可能多的制冷量。为此，我们需要研究热能和机械能相互转换时的条件及其规律。这就是下面要讨论的热力学第一定律和热力学第二定律。理解热力学第一定律和第二定律有助于掌握制冷空调系统的运行原理。

热力学第一定律是能量转换及守恒定律在热力过程中的具体表述，其表述为：无论何种热力过程，在机械能与热能的转换或热能的转移中，系统和外界的总能量守恒。即：

输入系统的能量－输出系统的能量＝系统贮存能量的变化

假设系统与环境之间交换的热量为 Q，与环境交换的功为 W，物体内能的变化量为 ΔE，则有关系式：

$$Q=\Delta E+W$$

式中 Q、W、ΔE 三者的单位都为 J。相应的符号规定分别为：若从外界吸热则 Q 取正值，若向外界放热则 Q 取负值；若系统对外做功，W 取正值；外界对系统做功，W 取负值；系统内能增加，ΔE 取正值；系统内能减少，ΔE 取负值。

上式的物理意义是：物体从外界吸收的热量，一部分使物体的内能增加，一部分用于物体对外做功。

4. 热力学第二定律

实践证明：一切实际的宏观热过程都具有方向性，热过程不可逆，这就是热力学第二定律所揭示的基本事实和基本规律。热力学第二定律有多种说法，但都反映同一客观规律，彼此是等效的。

1) 克劳修斯说法

人们很早就发现两个温度不同的物体相接触时热量总是从高温物体传向低温物体，而不可能自发地反向进行。克劳修斯在1850年简明扼要地概述为：热不能自发地、不付出代价地、从低温物体传至高温物体。

2) 开尔文·普朗克说法

人们逐渐认识到要使热能连续地转化为机械能，必须存在温度差，至少需有两个温度不同的热源。只有一个热源的热动力装置是无法工作的。同时还认识到，热能转化成机械能是有限度的，高温热源提供的热量无论如何不可能全部转为机械能，不可避免地要有一部分热能转移到低温热源。1851年开尔文将之概述为：不可能制造出从单一热源吸热，使之全部转化为功而不留下其他任何变化的热力发动机。

5.1.3　某冷冻站的工艺流程分析

某冷冻站的工艺流程如图5.11所示，由冷水机组、冷却水系统、冷冻水系统组成。共有3台冷水机组，系统根据建筑冷负荷的情况选择运行台数。图中冷水机组的左侧是冷却水系统，含有3台冷却塔及相应的冷却水泵及管道系统。冷却水系统的作用是负责向冷水机组的冷凝器提供冷却水。图中冷水机组的右侧是冷冻水系统，由冷冻水循环泵、集水器、分水器、管道系统等组成。冷冻水系统的作用是把冷水机组的蒸发器提供的冷量，通过冷冻水(冷媒)输送到各类冷水用户(如组合式空调机组和风机盘管)。

冷水机组运行时，通过蒸发器中的制冷剂吸收冷冻水的热量，使冷冻水保持低温。在冷凝器中制冷剂需通过冷却水向室外环境排出热量。因此，在冷水机组开启时，必须首先开启冷却水和冷冻水系统的阀门和水泵、风机。保证冷凝器和蒸发器中有一定的水量流过，冷水机组才能启动。否则，会造成制冷机高压超高、低压过低，直接引起电机过流，易造成对机组的损害。冷水机组都随机携带有水流开关，水流开关的电气接线要串联在制冷机启动回路上。当水流达到一定流速值，水流开关吸合，制冷机才能被启动。这样就起到了冷水机组自身的流量保护作用。

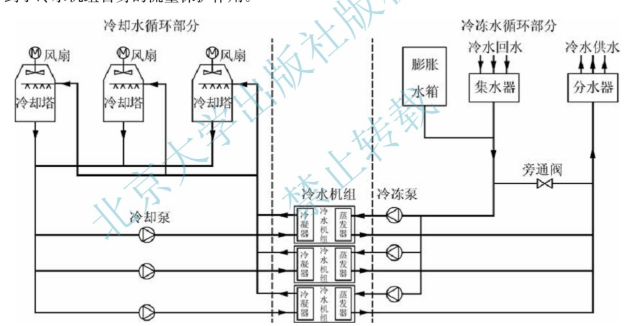


图5.11　采用压缩式制冷系统的冷冻站运行原理图

5.1.4　冷冻站机电设备的启停顺序

冷冻站机电设备的启停控制不仅包括冷水机组启停，还包括对应的冷冻水泵、开关蝶阀、冷却塔、冷却水泵等。冷水机组是整个建筑物空调冷源系统的核心设备。冷冻水循环、冷却水循环都是根据冷水机组的运行状态进行相应控制的。

1. 冷冻站机电设备间的电气联锁

为保证整个系统安全运行，在启动或停止的过程中冷水机组应与相应的冷冻水泵、冷却水泵、冷却塔等进行电气联锁。只有当所有附属设备及附件都正常运行工作之后，冷水

机组才能启动；而停车时的顺序则相反，应是冷水机组优先停车。当有多台冷水机组并联且在水管路中泵与冷水机组不是一一对应连接时，则冷水机组冷冻水和冷却水接管上应设有电动蝶阀，以使冷水机组与水泵的运行能一一对应进行。该电动蝶阀应参加上述联锁。

2. 冷冻站机电设备启停的逻辑顺序

冷冻站工艺复杂、设备多，其启停通常按照事先编制的时间假日程序控制。每次启停时各机电设备的启/停控制流程如图 5.12 所示。当需要启动冷水机组时，一般首先启动冷却塔，其次启动冷却水循环系统，然后是冷冻水循环系统的启动，当确定冷却水、冷冻水循环系统均已启动后方可启动冷水机组。当需要停止冷水机组时，停止的顺序与启动顺序正好相反。这些功能都需要 BAS 来实现。

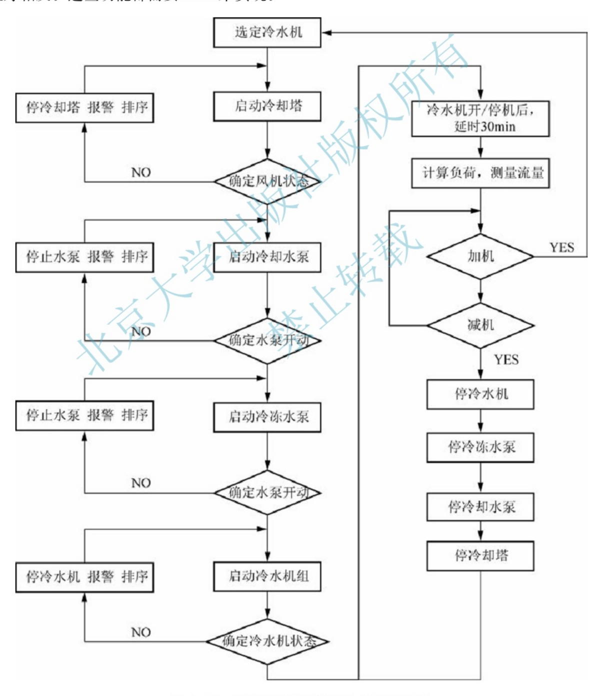


图 5.12 冷冻站机电设备的启/停控制流程

5.2 冷冻站的控制概述

5.2.1 BAS对冷冻站控制的思路

在现代建筑中，冷水机组及水系统的能耗是暖通空调系统能耗的最主要部分，约占建筑总能耗的25%～50%。冷冻站设备不仅工艺复杂，而且节能技术手段丰富。对冷冻站进行良好的监测和控制不仅有助于提高制冷系统运行的可靠性，而且还能降低其总能耗，提高运行经济效益。

目前，无论是压缩式制冷系统、吸收式制冷系统或蓄冰制冷系统，设备厂商一般均提供与冷水机组设备本身成套的自动控制装置。机组自带的控制系统本身能独立完成机组监控与能量调节的功能，而且这些设备大多都留有与外界的通信接口。当与BAS系统相连时，需考虑机组成套控制系统包含哪些监控功能，以及如何与BAS进行数据通信。通信接口形式有两种，一种为RS232/RS485通信接口，一种为干触点接口。通过RS232/RS485接口，可以实现BAS与主机的完全通信，而干触点接口只能接受外部的启停控制，向外输出报警信号等，功能相对简单。

目前，BAS对于这类自身带有控制系统的成套设备的监控主要有三种做法。

1. BAS不与冷水机组和锅炉主机的控制器通信

BAS不与冷水机组和锅炉主机的控制器通信，而是另外在冷冻水、冷却水管路上安装水温传感器、流量传感器，在配电箱中通过交流接触器辅助触头、热继电器触点等方式取得这些主机的工作状态参数，通过端子排或交流接触器控制设备的启停。这种监测方法不能深入到主机内部，对冷水机组内部的运行参数，如压缩机吸排气的压力、润滑油压力和油温等都无法检测，因此检测信号是不完整的。主机设备不能放心地交由BAS管理，冷热源机房还必须有人专门值守。

2. BAS采用冷水机组和锅炉主机制造商提供的冷冻站或锅炉房管理系统

这类管理系统能够把冷冻站或锅炉房内的设备全部监控起来管理，形成一个独立的冷热源监控管理系统，一般由冷热源设备厂商提供。采用这种方式可提高控制系统的可靠性和简便性，但是从优化的角度看由于冷冻站(或锅炉房)的控制还与空调水系统有关，用冷冻站(或锅炉房)内的水压以及水温的变化不能完全反映系统的特性。不过这类独立的控制管理系统的节能控制效果仍然是可观的，在工程设计中仍不失为一种上佳的选择方案。

以YORK公司的冷水机组监控系统ISN™(Integrated Systems Networks)为例，BAS则可以通过YORKTalk译码器与冷冻机与监控系统相连。通过YORKTalk与BAS监控系统通信，此时，BAS可以读取系统的所有信息，同时也可通过YORKTalk实现对机组的启停等控制。

3. BAS与冷源主机通信

为了解决建筑物各种机电设备，特别是暖通空调设备的互连问题，早在1995年，美国ASHRAE学会(采暖通风空调制冷工程师学会)就制订了解决这一问题的通信协议

BACnet。如果各设备制造商和控制系统公司都遵守这一协议，则大楼内的各种机电设备就有望实现无缝的连接。这些设备中最主要的就是冷冻机，但是由于各种原因，BACnet协议未能得到广泛的应用，使得原来预期的实现各种控制器统一通信和信息互换的局面没有如期实现。但实现通信协议的统一是发展方向。

当控制系统与冷水机组的协议不统一时，需要开发通信接口来解决互连问题。在通信接口开发时，冷水机组制造商应开放其通信协议。

上述三种方法各有利弊。不过，在目前的实际工程中BAS对自带控制系统的成套设备的监控，往往采用简单的“只监不控”的策略。

5.2.2 冷冻站监控实例

如图5.11所示采用压缩式制冷系统的冷源系统(冷冻站)。本小节以此为例，分析BAS对冷冻站监控的设计思路和过程。其监控设计结果如图5.13所示。

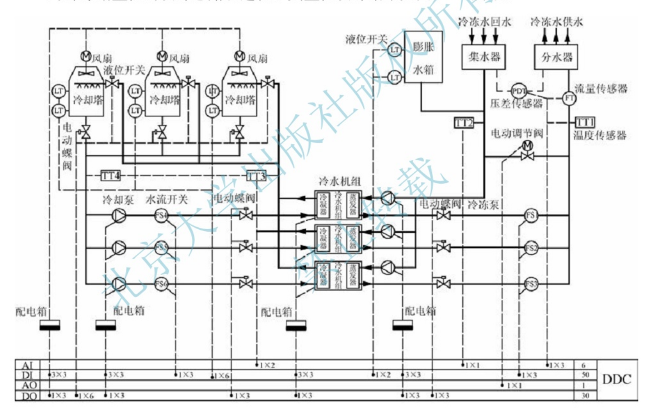


图5.13 采用压缩式制冷系统的冷冻站BAS监控原理

1. 受控对象的工艺流程分析

该冷冻站工艺流程分析参见5.1.3节。

2. 监控需求分析

一般根据业主的需求和相关标准进行BAS监控的需求分析。该系统的监控要求有如下目的和功能。

1）压缩式制冷系统实行监控的目的

（1）保证冷冻机蒸发器通过稳定的水量以使其正常工作。

(2) 向空调冷冻水用户提供足够的水量以满足使用要求。

(3) 在满足使用要求的前提下，尽可能提高供水温度，从而提高机组的 *COP* 值，同时减少系统的冷量损失，实现系统的经济运行。

2) 压缩式制冷系统的监控功能

(1) 启停控制和运行状态显示。

(2) 冷冻水进出口温度、压力测量。

(3) 冷却水进出口温度、压力测量。

(4) 过载报警。

(5) 水流量测量及冷量记录。

(6) 运行时间和启动次数记录。

(7) 制冷系统启停控制程序的设定。

(8) 冷冻水旁通阀压差控制。

(9) 冷冻水温度再设定。

(10) 台数控制。

3. 压缩式制冷系统的监控策略分析

冷水机组带有由厂家供应的完整的控制系统，BAS 对 3 台冷水机组采用监测为主，控制为辅的策略(主要是启停控制)，而对冷水机组内部的运行不直接控制。BAS 监控的任务是监测各设备的工作状态、工作参数、控制设备的启停。检测设备的报警信号，保证设备安全运行。

1) 启停控制、运行状态显示和过载报警

相关的监控对象有冷水机组、水泵、冷却塔风机等。BAS 对这些机电设备的监控原理是基本相同的，实质上就是 BAS 对三相电动机的控制。其监控内容一般包括：启/停控制及状态监视、故障报警监视、手/自动控制状态监视等。其监控点一般都直接取自其电气控制回路。有关的监控原理详见 5.3 节。

2) 冷负荷计算和冷水机组运行台数的控制

对冷源或者热源，其冷热负荷 $Q=c\cdot M\cdot(t_1-t_2)$，其中 c 为比热，M 为总管流量，t_1、t_2分别是供、回水总管上的温度。因此，为使设备容量与变化的负荷相匹配以节约能源，应根据计算的负荷，决定开启冷冻机的数量。详见 5.4 节。

3) 机组的启停顺序控制

详见 5.4 节。

4. BA 监控点位的确定

根据以上的监控思路，绘制监控原理图如图 5.13 所示。BAS 对各设备的监控点位说明如下。

1) 冷水机组的监控

对冷水机组的监控包含：启/停控制和运行状态、过载状态、手/自动状态的监测。所以，每台冷水机组共计 1 个 DO，3 个 DI 点。现有 3 台冷水机组，故占有 DDC 点位共计 3(即 1×3)个 DO，9(即 3×3)个 DI 点。在图中的 DO、DI 的点位统计表中分别表示表示为“·1＊3”和“·3＊3”。

2）冷却水循环部分的监控

每台冷却塔含有一个风扇，DDC 对每个风扇进行启/停控制和运行状态、过载状态、手/自动状态的监测，共计 1 个 DO，3 个 DI 点。现有 3 台冷却塔的风扇，故共计 3 个 DO，9 个 DI 点。

在每个冷却塔内设置液位开关 LT，以监测高低水位，供 DDC 在液位过高或过低时报警，计 2 个 DI 点。3 台冷却塔共计 6 个 DI 点。

3 台冷却塔的供回总管上的水温度监测，需配置温度传感器 TT3 和 TT4 监测，2 个 AI 点。

3 台冷却水泵的启停控制和状态(运行状态、过载状态、手自动状态)监测，共计 3 个 DO 点和 9 个 DI 点。

3 台冷却水泵的出水侧管道分别安装了水流开关 FS，判断水是否流动，从而监测水泵的实际运行状态，共计 3DI。(注：也可以在水泵两端安装压差开关以监测水压差、判断水泵的实际运行状态。)

冷却水循环部分共有 6 个开关蝶阀进行冷却水的开关控制，共计 6 个 DO 点。

3）冷冻水循环部分的监控

3 台冷冻水泵的启停和状态，共计 3 个 DO 点和 3 个 DI 点。

3 台冷冻水泵出水侧的水流开关，用于测量水泵的实际运行状态，共计 3 个 DI 点。

3 个冷冻水循环开关蝶阀，共计 3 个 DO 点。

用液位开关检测膨胀水箱的高低警戒水位，共计 2 个 DI 点。

设置温度传感器 TT1、TT2 和流量传感器 FT 检测冷冻水的供回水温度和冷冻水流量，用于计算冷负荷，共 3 个 AI 点。

压差传感器 PDT 检测冷冻水供回水压差，DDC 据此压差传感器做出逻辑运算，控制旁通管上旁通调节阀的阀芯的开度，从而实现压差旁通控制，共计 1 个 AI 点和 1 个 AO 点。

5.3 BAS 对水泵、风机等机电设备的控制

在暖通空调系统中，经常遇到冷冻水循环泵、冷却水循环泵、一次热水循环泵、二次热水循环泵，还有冷却塔风机、空调机组和新风机组的风机等机电设备。这类设备一般都由三相电源供电，内部都有电动机。因此，BAS 对这类机电设备的控制都可以归结于对电动机的控制。大多数由 BAS 直接控制启停的电气设备，如风机、照明、水泵、电动机等的监控原理基本相同，其监控内容一般包括：启/停控制及状态监视、故障报警监视、手/自动控制状态监视等。其监控点一般都直接取自其电气控制回路(装在电控箱内)。冷水机组中的压缩机也一般是由三相电动机驱动，BAS 也可以按照这样的思路对冷水机组实现简单的控制。

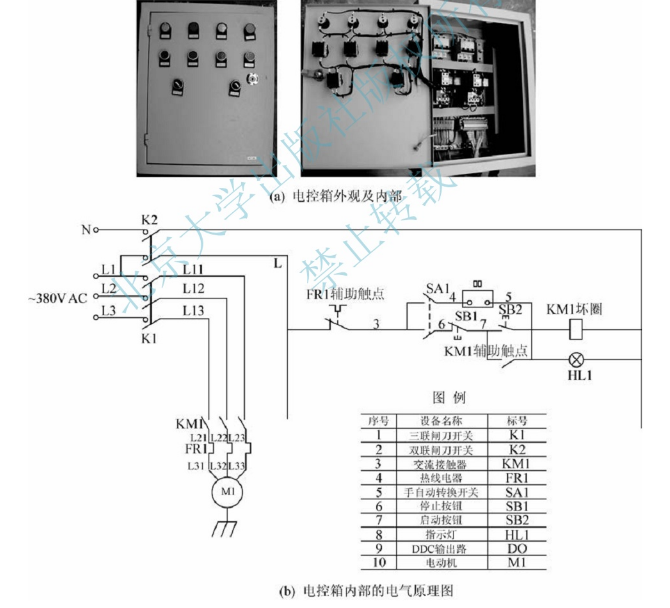
具体来说，BAS 对每一台水泵、风机、冷水机组分别需要的监控点位数有：1DO，3DI。BAS 通过 DDC 发出命令控制这些设备的启动与停止，这需要占用 DDC 的 1 路 DO 通道。BAS 需要知道这些设备是否处在运行状态，检测方法是将主电路上交流接触器的辅助触点作为开关量信号，输入 DDC 监测冷水机的运行状态，这占用 DDC 的 1 路 DI 通道。

BAS还需要知道这些设备是否过载，以便做出报警等逻辑动作，检测方法是主电路上热继电器的辅助触点信号，作为过载停机报警信号，这要占用DDC的1路DI通道。BAS还需对监控对象是否处在手动/自动状态进行检测，这也将占用DDC的1路DI通道。

特别提示

对于水泵，除对其电动机的监控外，还通常通过水流开关FS监测水泵回路的水流状态或者通过压差开关监测水泵前后的压差来进一步确认水泵的运行状态。对于风机，除对其电动机的监控外，通常还通过空气压差开关来进一步确认风机运行状态。若水和空气流动异常(流量太小)，则自动报警并做相应联锁动作。

如图5.14所示典型电气设备电控箱及电气控制原理图。电气原理图由主回路(一次回



序号	设备名称	标号
1	三联闸刀开关	K1
2	双联闸刀开关	K2
3	交流接触器	KM1
4	热线电器	FR1
5	手自动转换开关	SA1
6	停止按钮	SB1
7	启动按钮	SB2
8	指示灯	HL1
9	DDC输出路	DO
10	电动机	M1

(b) 电控箱内部的电气原理图

图5.14 典型电气设备电控制箱及电气控制原理图

路)与控制回路(二次回路)两部分组成。主回路工作电压为三相 380V，以闸刀开关或空气断路器作为电源进线开关，以便故障检修时形成明显的断点，确保安全。主回路通过接触器对设备电源进行控制，采用热继电器对设备进行过载保护。控制回路主要实现对主回路接触器的控制，工作电压是 220V。此回路一般要求以手/自动两种方式对风机启/停进行控制。具体设计方案是：利用一个手/自动转换开关，实现手动回路与自动回路之间的转换。当拨到手动挡时，操作人员可通过启动按钮、停止按钮、接触器线圈以及接触器辅助常开触点组成的自保持电路在现场对设备进行控制；当拨到自动挡时，设备的启/停则受 DDC 的控制。

监控内容中的启/停控制实际上就是对图中主回路中接触器的控制，启/停状态信号取自接触器辅助触点，故障状态信号取自热继电器的辅助触点，手/自动转换信号取自手自动转换开关。

有关二次回路的设计在第 3 章已有所论述，读者可相互对照着理解。

5.4 冷水机组的群控

5.4.1 冷水机组的群控概况

一般来说，在大型建筑中通常使用多台冷水机组为空调末端设备提供冷量。当冷冻站的供冷能力大于实际所需的制冷量时，关停其中正在运行的一台冷水机组；当实际所需的制冷量大于在运行的冷水机组所能提供的最大制冷量时，开启一台冷水机组。

中央空调在全年的运行时段中，大部分时间是处在部分负荷运行工况的。在满足末端负荷需求的前提下，根据大楼的冷负荷启停冷水机组，可以使运行的冷水机组的总 *COP* 最高，仍然运行在最佳效率值附近，并且避免冷水机组在小负荷运行时发生压缩机喘振或温度控制失效。另外，通过合理的控制使所有冷水机组的总运行时间大致相等，从而可以延长冷水机组运行寿命，降低其维修费用和发生故障的概率。

这种对所有冷水机组的启停顺序的控制，通常也叫做时序控制(sequence control)，也就是就是工程上所说的冷水机组的群控问题。冷水机组的群控策略就是要解决如下两方面问题：

(1) 在启动下一台冷水机组时，决定哪一台先启动?

(2) 在停止一台运行的冷水机组时，决定哪一台先停止?

群控的目的是与设备管理、维修计划更好地配合，充分利用设备的无故障周期，提高设备的使用寿命，从而实现系统的经济运行。

合适的冷水机组群控方法对于提高整个空调系统的运行性能至关重要。当使用多台不同种类和不同效率的制冷机，且每台制冷机的制冷能力各不相同时，对它们的时序控制将变得尤为复杂。

特别提示

一般的过程控制系统通常采用反馈控制的形式，这是过程控制的主要方式。而在多台冷水机组、多台冷冻/冷却水泵这类批量型的过程操作中，则需要采用顺序控制方式。

顺序控制(Sequence Control)是指按照预先给定的顺序或条件对各控制阶段逐次进行控制。顺序控制常采用可编程序逻辑控制器(PLC)或继电器来实现。在BAS工程中可以通过DDC控制器的DI/DO通道来实现顺序控制。

5.4.2 冷水机组运行台数的确定

中央空调的需冷量通常可以用回水温度或实际冷负荷来反映，进而确定冷水机组的运行台数，并进行冷水机组的启停控制。

1. 根据回水温度确定冷水机组运行台数

通常冷水机组的出水温度设定为7℃，冷冻水供、回水温差大多为5℃。在冷水机组出水温度恒定的空调水系统中，不同的回水温度实际上反映了空调系统中不同的需冷量。因此，根据回水温度可确定冷水机组运行台数。

回水温度控制的方式在控制精度上受到了温度传感器的约束。为了保证投入运行的新冷水机组达到所必需的负荷率(通常有20%～30%考虑)，减少误投入的可能性及降低由于迟投入带来的不利影响，如果采用回水温度来决定冷水机组的运行台数，则要求系统内冷水机组的台数不应超过2台。

知识链接

水管温度传感器测量精度对冷水机组运行台数控制的影响分析

假设所选用的水管温度传感器精度为±0.3℃。对于只有1台冷水机组的系统，回水温度的测量显示值范围为6.7～12.3℃，其控制冷量的误差在12%左右。

对于有2台相同制冷量的冷水机组的系统，从1台运行转为2台运行的条件是回水温度为9.5℃，而实际测量值有可能是9.2～9.8℃。这说明，当显示回水温度为9.5℃时，系统实际需冷量的范围是在总设计冷量的44%～56%。如果此时是低限值，则说明转换的时间过早，已运行的冷水机组此时只有其单机容量的88%，而不是100%，这时投入2台会使每台冷水机组的负荷率只有44%，明显是低效率运转而耗能的。如果为高限值(56%)，则说明转换时间过晚，已运行的冷水机组的负荷率已达到其单机容量的112%，处于超负荷工作状态。

当系统内有3台同冷量冷水机组时，上述控制的误差更为明显。以此类推，其结论是：冷水机组设计选用台数越多而实际运行数量越少时，上述由于温度传感器精度所带来的误差越为严重。

2. 根据实际冷负荷确定冷水机组运行台数

对冷/热源，可用公式$Q=c\cdot M\cdot(t_1-t_2)$计算冷/热负荷。其中，c为比热；M为总管流量；t_1、t_2分别是供、回水总管上的温度。因此，通过测量用户侧供、回水温度t_1、t_2及冷冻水流量M，根据计算的实际冷/热负荷决定开启冷水机组的台数，则可使冷冻站的

供冷量与变化的负荷相匹配，从而节约能源。相对回水温度控制的方式来说，这种方式更为精确。

通过供水管网中分水器上的温度传感器 TT1 检测冷冻水供水温度(1 路 AI 信号)，通过回水管网中集水器上的温度传感器 TT2 检测冷冻水回水温度(1 路 AI 信号)以及供水总管上的流量传感器 FT(1 路 AI 信号)检测冷(冻)水流量，送入 DDC，计算出实际的空调冷负荷，控制冷水机组投入台数及相应的循环水泵投入台数如图 5.12 所示。

在工程设计和施工中，供/回水温度传感器和流量传感器的安装位置对实际冷负荷的精度影响很大。在图 5.15(a)、(b)所示的安装方式中，回水温度和流量的测取位置都位于用户侧，供水温度的测取位置分别在用户侧和冷源侧，但两者的测量值是相同的。这 3 个测量值可以反映实际冷负荷，因此是正确的。图 5.15(c)、(d)不能正确反映实际冷负荷，因此是错误的。

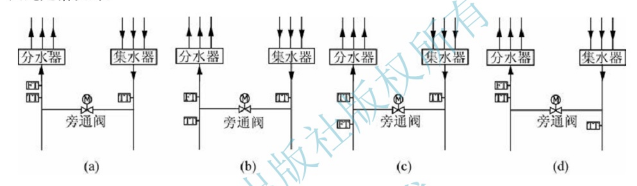


图 5.15 冷冻水供回水总管温度及流量测取位置

为了保证流量传感器达到其测量精度，应把它设于管路中水流稳定处，并在设计安装时保证其前面(来水流方向)直管段长管不小于 5 倍接管直径，后面直管段长度不小于 3 倍接管直径。另外，在空调水系统中，为了减少水系统阻力，一般不采用孔板式流量计而采用电磁式流量计。电磁式流量计的测量精度大约为 1%。

特别提示

图 5.13 旁通管位于供水管和回水管之间。而如果旁通管设于分、集水缸之间，则三个传感器的测量值会使实际冷负荷的计算误差偏大，对机组台数控制显然是不利的。

读者如果有兴趣的话，可以对传感器在不同安装位置时实际冷负荷的误差进行计算、分析和比较。

5.4.3 冷水机组运行时间、启动次数记录

冷冻站工艺复杂、设备多，其启停通常按照事先编制的时间假日程序控制。为了延长机组设备的使用寿命，需记录各机组设备的运行累计小时数及启动次数。通常要求各机组设备的运行累计小时数及启动次数尽可能相同。因此，每次启动系统时，都应优先启动累计运行小时数最少的设备(除特殊设计要求，如某台冷水机组是专为低负荷节能运行而设置的)。

BAS 通过软件程序对各机电设备进行运行时间和启动次数记录，以供逻辑判断。

5.4.4 群控的序列策略

BAS根据监测计算得到的空调系统实时冷负荷和机组运行时间、启动次数记录，可以确定启/停哪一台设备。多台冷水机组启/停控制的流程参见图5.11。

在需要启动一台制冷机时可按如下的优先顺序确定：

（1）当前停运时间最长的优先。

（2）累计运行时间最少的优先。

（3）轮流排队等。

在需要停止一台制冷机组时可按如下的优先顺序确定：

（1）当前运行时间最长的优先。

（2）累计运行时间最长的优先。

（3）轮流排队等。

选择哪一种序列策略与物业管理方式，设备维护计划等密切相关。BAS应尽量提供灵活的序列模式，便于物业管理部门按需选择。

特别提示

目前流行的冷冻机组群控，包括以上这些监控，通常由冷水机组厂家(如York，Carrier，Mcquary，Trane等)自己完成，而BAS则通过网关与其通信，完成对冷冻机系统的监测。

5.5 空调冷冻水循环系统的控制

5.5.1 冷冻水循环系统的认知

1. 冷冻水循环系统概述

冷冻水循环系统的主要作用是可靠经济地将冷水机组提供的冷冻水传输到各末端用户。在中央空调系统中，冷冻水系统通常分为两个环路：一次环路和二次环路。一次环路与冷水机组蒸发器相接，主要功能是产生低温冷冻水。二次环路将冷冻水传输和分配到各末端用户，是冷冻水在用户侧的分配管路系统。

冷冻水分配系统可以通过末端使用二通阀进行变流量，也可以通过在末端使用三通阀而定流量。当使用三通阀时，在低负荷下，分配系统的水流量将大于末端实际所需的水流量，因此会有一定的浪费。分配系统可以使用定速水泵，也可以使用变频水泵。变频水泵可以调节分配系统的水流量，使之与末端实际所需的水流量相匹配，实现节能运行。

特别提示

空调热水系统与空调冷冻水系统的设置和控制方式基本相同。而且常常在一些工程项目中，空调热水系统与冷冻水系统共用一套管道，通过阀门切换供回水管与冷热源的连接。

本书不单独设置章节来介绍空调热水的控制。

2. 冷冻水循环系统的设备组成

空调冷冻水循环系统的作用是将冷源提供的冷冻水送至空气处理设备。其组成主要有冷冻水水源、供回水管、阀门、仪表、集箱、水泵、空调机组或风机盘管、膨胀水箱等。

供回水管一般采用镀锌无缝钢管。集水器和分水器用无缝钢管制成，实际上是一根直径较大的管子、在上面焊接了许多不同管径的管接头，以连接不同区域的空调水管。集水器和分水器上装有若干阀门，用来控制空调的供、回水流量，起着冷冻水流量分配、调节和管理的作用。集水器和分水器上还装有温度计、压力表以及传感器，便于监测、控制。空调冷冻水系统的阀门有手动阀门和自动阀门两种。手动阀门有闸阀、截止阀和蝶阀。自动阀门有电磁阀和电动调节阀。膨胀水箱一般设置在系统的最高点。在密闭循环的冷冻水系统中，冷冻水的体积随水温而变化，此时膨胀水箱可以容纳或补充系统的水量。

知识链接

冷冻水循环系统用户侧管路的布置形式简介

冷冻水循环系统在用户侧的管路布置的方法有很多种。按水压特性的不同，有开式系统和闭式系统。按末端设备水流程的不同，有同程式系统和异程式系统。按空调末端设备的冷、热水管道设置方式的不同，有双管制系统、三管制系统和四管制系统。

1. 开式系统和闭式系统

开式系统是指水流经末端空气处理设备后，依靠重力作用流入建筑物地下室的蓄水池，再经冷却和加热后由水泵送至各个用户盘管系统，如图5.16(a)所示。这种系统结构简单，水池有一定的蓄冷能力，可以部分降低用电峰值和电气设备的安装容量。但水池占地面积大，并与大气接触，水质易污染，管道容易被堵塞、腐蚀。另外，由于管道与大气相通，水泵不仅要克服水系统的阻力，还要把水提升到末端设备的高度，这造成系统静压大、水泵扬程及电机功率较大等缺点。该系统已经逐渐被淘汰。

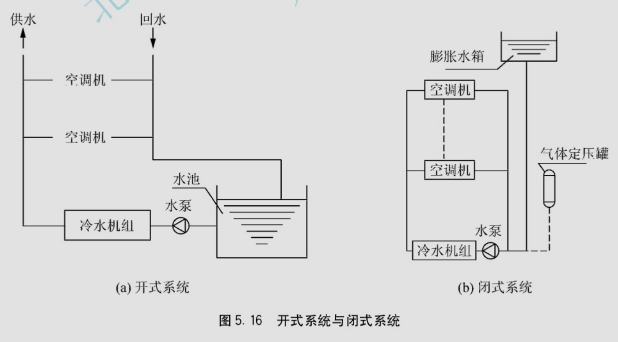


图5.16 开式系统与闭式系统

闭式系统的冷冻水在密闭的管道中循环，不与大气接触，仅在系统的最高点设置膨胀水箱，如图5.16(b)所示。闭式系统水泵只用来克服管网的循环阻力，不需克服水的静压力，因此水泵扬程比开式系统要小得多，相应的电耗也降低。闭式系统无论水泵运行和停止，管道内都充满水，不与大气接触，避免了管道的腐蚀。在系统中的最高点设置开式膨胀水箱作为系统的定压设备，水箱水位通常应比系统最高的水管高出1.5m以上。闭式系统克服了开式系统的缺点，得到了广泛的应用，是目前唯一适用于高层民用建筑的空调冷冻水系统形式。

2. 同程式系统和异程式系统

同程式系统是指系统中的每个循环环路的长度相同，如图5.17(a)所示。该系统的特点是各环路的水流阻力、冷(热)量损失相等或近似相等，这样会有利于水力平衡，从而大大减少系统调试的工作量。

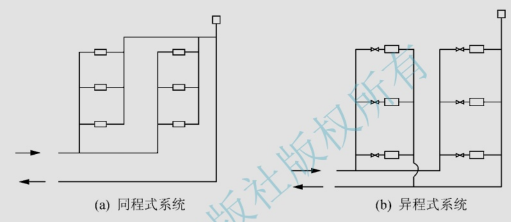


图5.17 同程系统与异程系统

异程式系统是指系统中水流经每个末端设备的流程都不相同，如图5.17(b)所示。该系统的特点是各环路的水流阻力不相等，容易产生水力失调；但是该系统的管路系统简单，投资较省。当系统的规模较小时，可以采用异程式系统，但是必须在末端空调机组或风机盘管的连接管上设置流量调节阀，以平衡系统的阻力。

3. 双管制系统、三管制系统和四管制系统

双管制系统是指冷、热源共同利用一组供回水管为末端装置(如空调机组或风机盘管)的换热盘管提供冷水(热水)的系统，如图5.18(a)所示。双管制系统的冷、热源各自独立。夏季，关闭热水总管阀门，打开冷冻水总管阀门，系统供应冷冻水；冬季，关闭冷冻水总管阀门，打开热水总管阀门，系统供应热水。因此，双管制系统不能同时既供冷又供热，不能满足过渡季节空调房间的不同冷暖要求。但该系统简单实用，投资少，在高层民用建筑中得到了广泛应用。

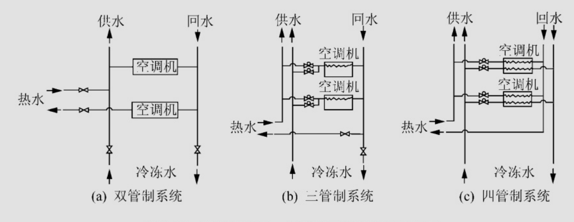


图5.18 双管制系统、三管制系统和四管制系统

三管制系统如图5.18(b)所示，是指冷、热源分别通过各自的供水管路为末端装置的冷盘管与热盘管提供冷水与热水，而冷热水回水共用一根回水管路的系统。三管制系统解决了两管制系统中各末端无法解决自由选择冷、热的问题，但在过渡季节使用时，冷热回水进入一根管道，混合损失较大，增加了制冷及加热的负荷，运行效益低，因此三管制系统现在很少应用。

四管制系统是指冷、热源分别通过各自的供、回水管路为末端装置的冷水盘管与热水盘管提供冷水与热水的系统。也就是末端装置的管路有四条，分别为热水供/回水管、冷水供/回水管，如图5.18(c)所示。四管制系统可同时使用冷、热源，同时满足冷、热要求不同的用户需求。四管制系统不存在三管制系统那样的冷、热抵消问题，因此节能性能更好。但四管制系统的管道复杂，占用空间比较大，投资大，运行管理要求高。四管制系统多用于舒适性要求高的场合。

3. 冷冻水循环系统水泵的设置

为克服冷冻水在一次环路和二次环路管路中循环流动的阻力，需要设置水泵。根据水泵设置的方式，可以分为一次泵冷冻水系统和二次泵冷冻水系统。

1）一次泵冷冻水系统

一次泵冷冻水系统的制冷机侧和负荷侧的流动阻力由同一组水泵克服。负荷侧可通过使用三通阀而实现定流量，如图5.19(a)所示。负荷侧也可以使用二通阀实现空调末端设备的冷冻水量的调节，如图5.19(b)所示。

图5.19(a)所示的定水量系统的水泵按系统的最大负荷选定，且流量不可调节。当处于部分负荷运行时，水泵提供的水流量大于实际负荷所需的水流量，造成管路上热损失的增加和功耗的消耗浪费。在空调全年运行时段中，大部分时间处于部分负荷运行状态。因此，定流量系统在经济上是不合理的。

图5.19(b)所示的冷冻水系统中，二通阀的调节必然使得末端实际所需的水流量变化，并使得供水管和回水管间的压差波动。而从制冷机可靠运行的角度来说，要求流经制冷机蒸发器的冷冻水流量和压差基本保持不变。为此，在供、回水管间设置旁通管，并在旁通管上安装压差旁通阀(Differential Pressure by－pass Valve，DPV)，以保证通过制冷机的冷冻水流量和压差的稳定。这种使用压差旁通阀的一次泵冷冻水系统在工程应用中比较常见。

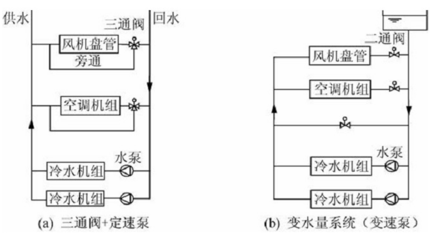


图5.19　一次泵冷冻水系统示意图

2）二次泵冷冻水系统

二次泵冷冻水系统的制冷机侧和负荷侧分别配有一组水泵，如图5.20所示。制冷机侧一次环路上的水泵称为一次泵，用户侧二次环路上的水泵称为二次泵。二次泵的总供水量与一次泵的总供水量有差异时，相差的部分就从平衡管(或称旁通管)AB中流过(可以从A流向B，也可以从B流向A)，这样就可以解决冷热源机组与用户侧水量控制不同步的问题。

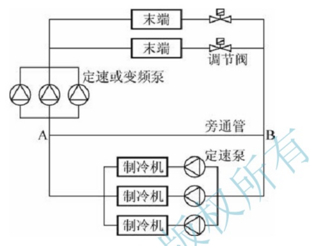


图5.20　二次泵冷冻水系统示意图

特别提示

在实际安装工程中，常将旁通管当成普通水管。当回水经旁通管从B流向A时，将降低冷冻水的供水温度。为防止此现象，可在旁通管上安装单向阀。

一次泵只需要克服制冷机蒸发器和一次环路的管路、阀门等设备的阻力损失，一次环路的冷冻水流量通常是设计流量。二次泵则克服用户侧整个二次环路上的管路、阀门及空调机组或风机盘管等设备的阻力损失，二次泵消耗的功耗比一次水泵要高。一次泵一般选用定速泵，二次泵可以使用定速水泵，也可以使用变频水泵。

由于二次泵冷冻水系统内的压力分别由一次泵和二次泵提供，水泵扬程小，水系统承受的压力也较小，特别适用于高层建筑。

5.5.2　一次泵冷冻水循环系统的控制

1. 压差旁通控制

在采用定速泵的一次泵冷冻水循环系统中，需要设置压差旁通阀来同时满足冷机组水量恒定和用户侧水量变化两方面的要求。通常根据冷冻水供/回水总管间的压差控制旁通阀的开度，以使冷冻水供/回水总管压差保持恒定，并且基本保持冷水机组的水量不变，起到节能和延长设备寿命的效果。

如图5.21所示典型应用中，主供回水管之间通过旁通管相连，通过压差传感器检测供回水管两端的压差，在旁通管上装有压差旁通阀进行流量控制。阀门的开度通过压差控制器(在BAS中通过DDC控制器)进行调节。当系统处于设计工况时，系统满负荷运行，

压差旁通阀的开度为零，即没有旁通水流过，此时压差控制器两端接口处的压差就是控制器的设定值。当末端负荷降低时，末端设备管路上的二通阀关小，末端的冷冻水流量相应降低，供回水管间的压差增大，超过设定值。此时，控制器将调节压差旁通阀，使其开度逐渐加大，以允许更多的冷冻水经旁通管直接返回制冷机，从而使主供回水管之间的压差降低。反之，当主供回水管之间的压差小于设定值时，压差旁通阀将根据控制器的信号逐渐关小，直至全关为止。通过上述的压差旁通控制作用，可基本保持冷冻水泵及冷冻机的水量不变。

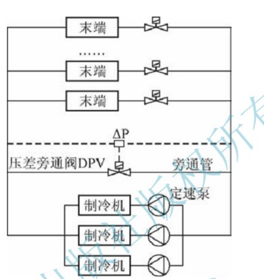


图 5.21　一次泵冷冻水系统的压差旁通控制示意图

特别提示

在安装压差传感器时，应注意其两端接管应尽可能靠近旁通阀两端，并设于水系统中压力较稳定的地点，以减少水流量的波动，提高控制的精确度。

旁通阀也是水泵台数启停控制的一个关键性因素。当旁通阀流量达到一台冷冻水泵的流量时，说明有一台水泵完全没有发挥作用，应停止一台冷冻水泵的运行以节能。因此，旁通阀的最大设计流量就是一台冷冻水泵的流量。

为提高系统运行效率，通常使用变频泵取代定速泵，从而在非设计工况下通过降低水泵转速，降低水泵功耗。



实　例

BAS 如何实现压差旁通控制

在图 5.13 的实例中，BAS 的监控方法是：由压差传感器 PDT 检测冷冻水供水管网中分水器与回水管网中集水器之间的压差，由 1 路 AI 信号送入 DDC 与设定值比较后，DDC 送出 1 路 AO 控制信号，调节位于供水管网中分水器与回水管网中集水器之间的旁通管上电动调节阀的开度，实现供水与回水之间的旁通。

2. 冷冻水供水温度再设定

对于冷冻水分配系统，能源消耗设备主要是冷水机组和冷冻水泵。当室内外环境变化时，末端实际负荷随之变化。若在满足末端负荷需求的前提下，通过控制系统对冷冻水温度设定值的再设定，使制冷机和冷冻水泵的总功耗最小，可达到显著的节能效果。

当冷冻水供水温度升高时，制冷机的蒸发温度也随之升高，从而使得压缩机进气压力升高，压缩机功耗降低。但是，由于冷冻水供水温度的升高将使得冷冻水通过末端时的温差降低。要保证冷冻水与空气的热交换效果，需增大冷冻水流量。冷冻水供水温度越高，末端需求的冷冻水流量就越大，冷冻水泵的功耗也就越多。因此，在实际应用中，特别是在变流量系统中，冷冻水供水温度与制冷机功耗和冷冻水泵功耗之间的关系更为复杂。

特别提示

当冷冻水回水温度保持恒定时，冷冻水供水温度每升高1℃，压缩机的功耗约降低2%～3%，而冷冻水泵的功耗约增加10%。

对于定速泵的一次泵冷冻水系统(图5.21)，冷冻水供水温度的优化设定相对比较简单。由于定速水泵的功耗基本保持不变，在满足末端负荷需求的前提下，对系统的优化就是使制冷机的功耗最小，因此冷冻水供水温度应尽可能越高越好。当只有一个或多个空调末端的水阀处于全开状态，且它们对应的空气出口温度能达到温度设定值时，此时的冷冻水供水温度为最优温度设定值。具体逻辑如下：

(1) 如果所有水阀都没全开或有些水阀已处于全开状态，但它们对应的空气处理单元的空气出口温度低于温度设定值时，增加冷冻水供水温度设定值；

(2) 如果不止一个水阀处于全开状态，且它们对应的空气处理单元的空气出口温度大于温度设定值时，降低冷冻水供水温度设定值。

3. 采用变速泵的一次泵冷冻水循环系统的控制

为提高系统运行效率，通常使用变速泵取代定速泵，从而在部分负荷运行工况下通过降低水系转速，降低水泵功耗。

如图5.22所示一次泵系统中，水泵的转速通过维持冷冻水分配系统最不利环路的压差在设定值来进行转速控制控制。压差设定值应确保能为所有末端提供足够的冷冻水流量。压差设定值可以保持恒定不变，也可以在部分负荷下适当降低。在许多变流量系统中，由于末端负荷连续改变，因而所需的冷冻水流量也连续变化，因此通过变频调节，可以显著降低水泵的功耗。

在这种系统中，当末端负荷很低时，系统所需的冷冻水流量也相应很小。此时，制冷机蒸发器中的冷冻水流量就有可能会低于蒸发器中冷冻水最小流量要求。为满足制冷机蒸发器对冷冻水最小流量的要求，在系统中需安装有旁通控制阀和流量计。当流量计测得的冷冻水流量小于制冷机蒸发器最小流量要求时，控制器将打开旁通阀，使部分冷冻水旁通直接回到蒸发器，从而确保制冷机蒸发器中冷冻水流量满足最小流量要求。可见这种一次泵变流量系统的旁通阀控制和制冷机时序控制比较复杂。在工程应用中若没有慎重考虑，将会导致中央空调系统不能正常工作。

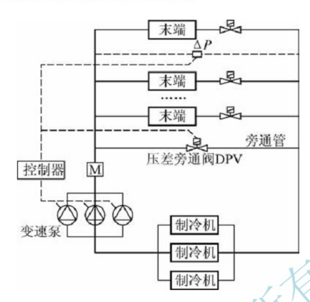


图 5.22 一次泵变流量系统示意图

知识链接

水泵变频调速节能的工作原理

1. 水泵的变频调速

水泵是在电动机转子的驱动下运转的。通过变频器改变电动机的供电频率，可以改变水泵的转速，从而调节水泵输送的水流量。转子转速 n 的计算式为：

$$n=60f\frac{1-s}{m}$$

式中 n——转子转速，r/min；

60——换算系数；

f——电源频率，Hz；

s——定子与转子之间的转差率；

m——电动机绕组的极对数。

上式表明：转子转速与频率成正比，改变频率就可以实现水泵调速。

根据水泵的相似定律，两种流体满足几何相似、动力相似和运动相似，则水泵的转速、流量、扬程和功率之间存在以下关系：

$$\frac{Q}{Q_m}=\frac{n}{n_m},\ \frac{H}{H_m}=\left(\frac{n}{n_m}\right)^2,\ \frac{N}{N_m}=\left(\frac{n}{n_m}\right)^3$$

式中 Q——水泵的流量，m^3/h；

H——水泵的扬程，m；

N——水泵的功率，kW。

因此：

$$\frac{N}{N_m}=\left(\frac{Q}{Q_m}\right)^3$$

该式表明：水泵所耗功率与流量的三次方成正比。因此，在部分负荷运行时，冷冻水泵通过变频调速降低流量，可以降低水泵功耗实现节能。

BAS对变速水泵的监控内容，除启停控制、运行状态、故障状态、手/自动状态外，还包括频率控制。

2. 变速泵的节能分析

当用户侧冷冻水需求量从 m_1 降到 m_2 时，如果使用定速水泵，水泵的特性曲线将始终保持不变，如图5.23(a)所示。为达到新的平衡，空调末端的水阀开度将逐渐关小，从而使系统的特性曲线相应发生变化。如果使用变速泵，水泵转速可适当降低，而末端水阀的开度也可适当关小，从而使水泵特性曲线和系统的特性曲线都发生变化，如图5.23(b)所示。具体的变化取决于具体选用的控制方法。采用的控制方法不同，新的平衡点也有所不同。

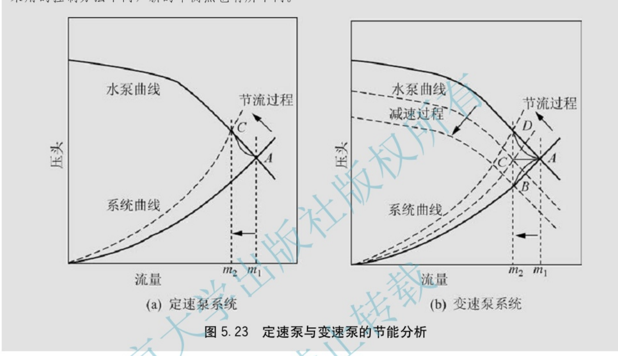


图5.23 定速泵与变速泵的节能分析

5.5.3 二次泵冷冻水循环系统的控制

1. 冷水机组运行台数控制

在二次泵系统中，由于连通管的作用，无法通过测量回水温度来决定冷水机组的运行台数。因此，二次泵系统冷水机组运行台数控制必须采用冷量控制的方式，其传感器设置原则与上述一次泵系统冷量控制相类似，如图5.24所示。

2. 一次泵的控制

二次泵系统的一次环路中，考虑到制冷机的稳定控制和安全运行，制冷机厂商一般推荐蒸发器中冷冻水流量应基本保持恒定不变。因而，一次环路的冷冻水流量通常是设计流量，一次泵常选用定速泵，其开启可同冷冻机联锁。

3. 定速二次泵的控制

在二次环路(冷冻水分配系统)中，可以使用定速水泵，也可以使用变频水泵。

图5.24所示的二次环路选用的是定速泵。为了保证二次泵的工作点基本不变，稳定用户环路，应在二次泵环路中设旁通电动阀。压差旁通阀的设置与一次泵空调冷冻水系统

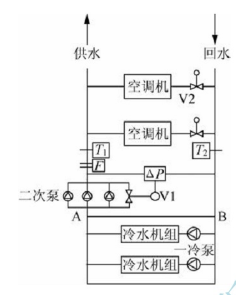


图 5.24 定速二次泵冷冻水系统的压差旁通控制示意图

类似。当系统需水量小于二次泵组运行的总水量时，旁通阀开度增大。当系统需水量大于运行的二次泵组总水量时，旁通阀开度减小。压差旁通阀 V1 的最大旁通量为 1 台二次泵的流量。

特别提示

注意二次泵环路中压差旁通阀的水量与连通管 AB 的水量是不一样的。压差旁通阀旁通的水量是二次泵组总供水量与用户侧需水量的差值，而连通管 AB 的水量是初级泵组与次级泵组供水量的差值。

定速二次泵运行台数可根据供回水压差或者冷冻水流量来控制。

1) 压差控制

根据用户侧供回水的压差，可控制二次泵的开启台数。当旁通阀开度增大，直至全开且供回水压差超过设定值时，则应停止 1 台二次泵运行。当旁通阀开度减小，直至全关且压差小于设定值时，则应增加 1 台二次泵投入运行。

由于压差的波动较大，测量精度有限(5%～10%)，显然采用这种方式直接控制次级泵时，精度会受到一定的限制，且由于必须了解两个以上的条件参数(旁通阀的开、闭情况及压差值)，因而使控制变得较为复杂。

2) 流量控制

前已述及，根据冷冻水流量传感器的测量值可以控制冷水机组的运行台数。同样，将此流量测定值与每台二次泵设计流量进行比较，即可方便地得出需要运行的二次泵台数。

由于流量测量的精度较高，因此这一控制是更为精确的方法。此时旁通阀仍然需要，但它只是作为水量旁通用而并不参与次级泵台数控制。

4. 变速二次泵的控制

使用定速水泵的二次环路，无论在低负荷状态还是高负荷状态，只要启动的水泵台数相同，水泵能耗是基本相同的。低负荷状态下会浪费大量能源。二次环路若选用变频水

泵，则可通过改变水泵电机频率，控制水泵转速，使得水泵功耗与用户冷冻水需求量相匹配，从而实现节能。显然，在这一过程中不再需要压差旁通阀。

二次泵的运行台数和变速控制可以根据二次泵的出口压力，也可以根据用户侧最不利端进回水压差 ΔP 进行确定。

应用实例

如图 5.25 所示某二次泵冷冻水系统的 BAS 监控原理图。本例中二次水泵根据用户侧最不利端进回水压差 ΔP 来确定的运行台数和运行频率。分析如下：

安装在冷冻机蒸发器回路中的循环泵 P1、P2 仅提供克服蒸发器及周围管件的阻力。二次泵 P3、P4 用于克服用户侧管路换热盘管、阀门等器件的阻力。当用户需水量与通过蒸发器的流量一致时，连通管 AB 间的压差就几乎为 0。这样即使有旁通管，旁通管内亦无流量。一次泵 P1、P2 的启停与冷水机组联锁，二次泵 P3、P4 根据用户侧水流量控制。当用户侧水流量大于通过冷冻机蒸发器的水流量时，旁通管由 B 向 A 旁通一部分流量在用户侧循环。当蒸发器水流量大于用户侧水流量时，则旁通管内水由 A 向 B 流动，将一部分冷冻机出口的水旁通回到蒸发器入口处。这样，只要旁通管管径足够大，用户侧调整流量就不会影响通过蒸发器内的水量。为了节省二次泵能耗，可以根据用户侧最不利端进回水压差 PDT 来调整加压泵开启台数或通过变频器改变其转速。用户侧水流量与蒸发器侧水流量间的关系可通过测定供回水温度来确定，从而确定冷水机组的运行方式。

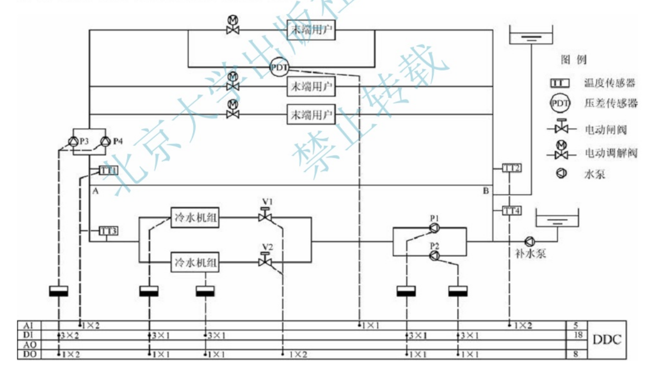


图 5.25 二次泵冷冻水系统的 BAS 监控原理图

5.5.4 空调冷冻水系统的监控实例

本小节仍以图 5.11 所示的工程项目为例。图 5.11 的右半部分即为空调冷源的冷冻水系统。冷冻水系统由冷冻水循环泵通过管道系统连接冷冻机蒸发器及各类空调末端(如空调机和风机盘管)组成。此回路的监控内容主要包括：冷冻水泵的监控、冷冻水

供/回水各项参数的监测、旁通水阀及膨胀水箱的监控等。BAS对冷冻水系统监控的原理参见图5.13。具体分析如下：

水流监测冷冻水泵启动后，通过水流开关FS(1路DI信号)监测水流状态，当流量太小甚至断流时，发出报警信号并自动停止相应制冷机运行。

冷冻水泵是冷冻水循环的主要动力设备，其监控内容一般包括：冷冻水泵的启/停及状态监视、冷冻水泵故障报警监视、冷冻水泵的手/自动控制状态监视等。冷冻水泵与制冷系统设备联锁控制启停，这应按照制冷系统的启停顺序进行。

DDC通过1路DO通道控制冷冻水泵的启停。将水泵电机主电路上交流接触器的辅助触点作为开关量输入(1路DI信号)，输入DDC监测冷冻水泵的运行状态。DDC从手自动转换开关取手/自动转换信号(1路DI信号)，以监测水泵的手/自动控制状态。主电路上热继电器的辅助触点信号(1路DI信号)作为冷冻水泵过载停机报警信号。

5.6 空调冷却水系统的控制

5.6.1 空调冷却水系统工艺流程认知

制冷系统中的高温高压气态制冷剂通过冷凝器散热冷凝为液态制冷剂。对于制冷量较大的冷水机组或水源热泵机组，常采用水作冷却剂。空调冷却水系统是将制冷系统中冷凝器的散热带走的水系统，是为水冷式冷水机组而设置的。对于风冷式冷水机组则不需要冷却水系统。

在民用建筑中，冷却水通常循环使用，如图5.26(a)所示。冷却水循环系统由水泵、冷却塔、阀门、管路等器件组成。

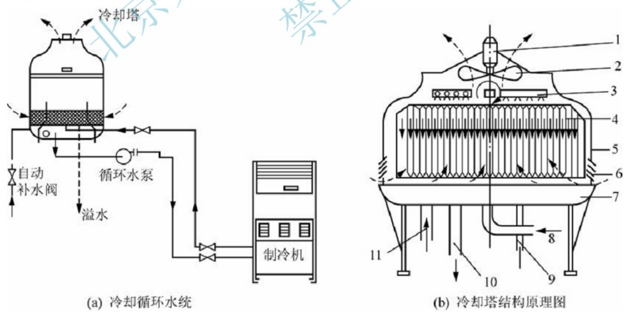


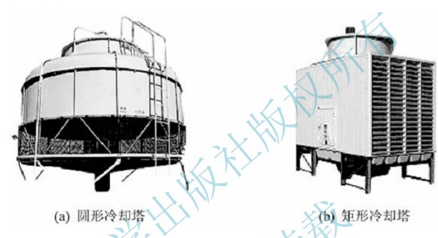
图5.26 冷却水循环系统

1—电机；2—风机；3—布水器；4—填料；5—塔体；6—进风百叶；7—水槽；8—进水；9—溢水管；10—出水管；11—补水管

来自冷却塔的较低温度(通常设计为32℃)的冷却水，经冷却泵加压后送入冷却机组，带走冷凝器的散热量。吸收热量的冷却水温度升高(通常设计为37℃)，被送至冷却塔。冷却水在喷淋下落的过程中，不断与下部进入的空气发生热湿交换，水温降低，从而将冷却水从冷凝器中吸收的热量排放到大气环境中。

冷却塔实质上是空气和水的热交换器。其在热湿交换过程中会产生水分蒸发，这将消耗一部分冷却水。一次当量直接冷却的水损失约占冷却水总流量的5%左右。冷却塔通常可以将冷却水温度冷却到比室外湿球温度约高2.5～5.5℃左右。对于损失的冷却水水量，可以通过自来水补充。

冷却塔通风方式有自然通风和机械通风两种。机械通风冷却塔的结构如图5.26(b)所示，冷却塔的实物图如图5.27所示。



(a) 圆形冷却塔　(b) 矩形冷却塔

图5.27　冷却塔的实务图

冷却塔应安装在通风良好的室外。在高层民用建筑中，多放在裙楼或主楼的屋顶。在布置时，首先要保证冷却塔的排风口上方无遮挡物，以避免排出的热风被遮挡而由进风口重新吸入，影响冷却效果。在进风口周围至少应有1m以上的净空，以保证进风气流不受影响，而且进风口处不应有大量的高湿热空气的排气口。冷却塔大都采用玻璃钢制造，难以达到非燃要求，因此要求消防排烟口必须远离冷却塔。

5.6.2　冷却水系统控制实例

冷却水系统是通过冷却塔、冷却水泵及管道系统向制冷机提供冷却水的系统。BAS对冷却水系统实行监控的主要作用是：

(1) 保证冷却塔风机、冷却水泵安全运行。

(2) 确保制冷机冷凝器侧有足够的冷却水通过。

(3) 根据室外气候情况及冷负荷调整冷却水运行工况，使冷却水温度在要求的设定温度范围内。

1. 冷却水系统的监控功能

(1) 水流状态显示。

(2) 冷却水泵过载报警。

(3) 冷却水泵启停控制及运行状态显示。

(4) 冷却塔风机运行状态显示。

(5) 进出口水温测量及控制。

(6) 水温再设定。

(7) 冷却塔风机启停控制。

(8) 冷却塔风机过载报警。

一个装有4台冷却塔及2台冷却水循环泵的冷却水系统的BAS监控原理图如图5.28所示。

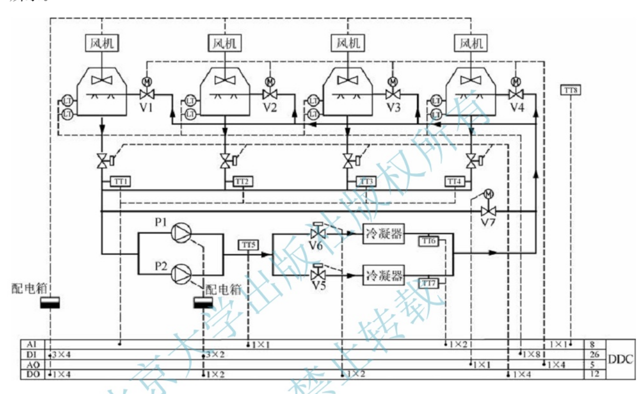


图5.28 冷却水系统的BAS监控原理图

2. 冷却水系统的监控功能描述

1) 冷却塔风机控制

每台冷却塔风机都是通过计算机进行启停控制。启停台数根据冷冻机开启台数、室外温湿度、冷却水温度、冷却水泵开启台数来决定。

每台冷却塔出水管上设温度测点(TT1～TT4),进水管上安装电动水阀(V1～V4),监测水温可确定冷却塔的工作状况。通过4个温度测点间温差调节电动水阀V1～V4,以调整进入各冷却塔的水量,使其均匀分配,以保证各冷却塔都能达到最大出力。

由于湿式冷却塔的工作性能主要取决于室外温湿度,因此设室外湿球温度测点TT8。当夜间或春秋季室外气温低,冷却水温度低于冷冻机要求的最低温度时,可以通过启停冷却塔台数或改变冷却塔风机的转速来调节冷却水温度,还能节约能源;也可适当打开混水阀V7,使一部分从冷凝器出来的水与从冷却塔出来的水混合,调整进入冷凝器的水温。

DDC通过4路AI通道输入冷却塔出水管温度信号;1路AI通道输入湿球温度信号;4路AO通道实现电动水阀调节。

DDC通过1路DO通道控制冷却塔风机的启停。将冷却塔风机电机主电路上交流接触器的辅助触点作为开关量(1路DI信号)，输入DDC监测冷却塔风机的运行状态。主电路上热继电器的辅助触点信号(1路DI信号)作为冷却塔风机过载停机报警信号。

冷却塔接水池设水位计用于监测冷却水系统水位。水位计可采用电容式水位状态传感器，能在各种恶劣条件下测出水位状态，并由计算机根据水位传感器的信号控制补水电动阀或补水泵动作。

2) 冷却水泵控制

冷却水泵也由计算机进行启停控制，并根据冷冻机开启台数决定它们的运行台数。

冷却水泵、冷却塔风机与制冷系统设备联锁控制启停。关于联锁关系在制冷系统监控部分有详细描述，这里不再赘述。

3) 水温监测

冷凝器入口水温测点TT5测得的水温是整个冷却水系统最主要的测量参数，由它可监测最终进入冷凝器的冷却水温度，依此启停各冷却塔和调整各冷却塔风机转速。

冷凝器出口水温测点TT6、TT7测得的温度，可确定这台冷凝器的工作状况。当某台冷凝器由于内部堵塞或管道系统误操作造成冷却水流量过小时，会使相应的冷凝器出口水温异常升高，从而及时发现故障；也可用水流开关指示冷凝器堵塞或管道系统误操作造成的冷却水流量过小或无水状态。

冷凝器入口处的两个电动阀V5、V6仅进行通断控制，在冷冻机停止时关闭，以防止冷却水短路，减少正在运行的冷凝器中的冷却水量。

5.7 热源设备的控制

5.7.1 热源设备工艺流程认知

热源是使燃料燃烧产生热能的部分，例如区域锅炉房或热电厂等。此外，还可以利用工业余热、太阳能、地热、核能等作为供暖系统的热源。

1. 供热方式

空调系统的热源通常为蒸汽或热水的方式。

1) 蒸汽

在采用蒸汽作为空调热源的系统中，通常采用城市热网或工厂、小区和单位自建的蒸汽锅炉提供高温蒸汽，一般都采用表压为0.2MPa以下的蒸汽。蒸汽热值较高，载热能力大，且不需要输送设备(只靠自身的压力即可送至用户的空调机组之中)。其汽化潜热在2200kJ/kg左右(随蒸汽压力的不同略有区别)，占使用的蒸汽热量的95%以上。

采用蒸汽为热源时，与之配套使用的一系列附件如减压阀、安全阀和疏水器等，其性能都直接关系到热源的合理利用，设计及管理人员应充分重视。

2) 热水

在暖通空调所用的热源中，热水的使用最为广泛。热水在使用的安全性方面比蒸汽优越，与空调冷水的性质基本相同，传热比较稳定。在空调机组中，常采用冷、热盘管合用

的方式(即人们常说的两管制)，以减少空调机组及系统的造价，热水能较好地满足此种方式，而蒸汽盘管通常不能与冷水盘管合用。热水使用时，不像蒸汽系统那样需要许多的附件，也给运行管理及维护带来了一定的方便。

空调热水在使用的过程中系统内存在结垢问题。水的结垢与水质和水温有关。当水温超过70℃时，结垢现象变得较为明显，它对换热设备的效率将产生较大的影响。因此，空调热水应尽可能地采用软化水，至少也应考虑如加药、采用电子除垢器等防止或缓解水结垢的一些水处理措施。

2. 热源装置

1）锅炉

锅炉是将燃料的化学能转换成热能，产生高温烟气，将热能传递给锅内的水进而产生热水或者蒸汽的加热设备。另外，也有消耗电能的电锅炉。

锅炉的种类、型号很多，它的类型及台数的选择，取决于锅炉的供热负荷、产热量、供热介质和燃料供应情况等因素。根据用途不同，锅炉分为动力锅炉(用于动力、发电)和供热锅炉(用于工业、供暖)；按所用燃料种类的不同，锅炉分为燃油锅炉、燃气锅炉、燃煤锅炉；按产生的热媒不同，锅炉分为热水锅炉、蒸汽锅炉；按工作压力的大小，锅炉分为低压锅炉、中压锅炉、高压锅炉。

锅炉的最基本组成部分是汽锅和炉子，为保证锅炉的正常工作和安全，还必须装设安全阀、水位表、水位报警器、压力表、主阀、排污阀、止回阀等，为节省燃料，还设有省煤器和空气预热器。

在空调热水系统中，由于空调机组及整个水系统要随建筑的使用要求进行调节与控制，通常设有中间换热器。设有蒸汽锅炉的建筑也为其冬季空调加湿提供了一个较好的条件。

2）热力站

热力站是供热网络(如城市热网)向热用户供热的连接场所，起着热能转换、调节向热用户供热的热媒参数以及供热计量的作用。

根据供热网络(一次热网)热媒的不同，可分为热水热力站和蒸汽热力站。热水热力站主要用于建筑的供暖、通风及热水供应系统等。在热力站内设有水-水换热器，将高温水换成热用户所需的一定温度的热水。蒸汽热力站是将一定压力的蒸汽经汽-水换热器，将热量传递给热水，达到一定温度，用于建筑供暖、通风及热水供应；也可以将蒸汽直接向厂区供应，以满足生产工艺用汽。

根据服务对象不同，可分为工业热力站和民用热力站。前者主要为工业生产服务，后者主要为民用建筑服务。

根据热力站的位置及功能，可分为用户热力站、集中热力站和区域热力站。用户热力站也称为用户热引入口，设置在单幢建筑的地沟入口或该建筑的地下室或底层处。若供热网络向一个街区或多幢建筑分配热能，则需要通过集中热力站。一般集中热力站设在单独的建筑内，也可设在某一幢建筑内。从集中热力站向各用户输送热能的网络，一般称为二级供热网络或二次供热网络。区域热力站一般用在大型的供热网络上，设在供热干线与分支干线连接处。

3）热交换器

空调系统终端热媒通常是65～70℃的热水，而锅炉(或城市热网)提供的经常是高温蒸汽或者90～95℃的高温热水。在空调系统中要完成高温蒸汽(或高温热水)与空调热水的转换。这种转换装置称为热交换器或换热器。

空调系统中的热源如高温蒸汽或高温热水先经过热交换器变成空调热水，经热水泵(有的系统与冷冻水泵合用)加压后经分水器送到各终端负载中，在各负载中进行热湿处理后，水温下降，水温下降后的空调水回流，经集水器进入热交换器再加热，依次循环。

在建筑楼层比较高时，如果空调水回路采用闭式系统直接向最高层的末端设备供应空调热水，系统的静压可能会超过设备和管路的承压能力。为了解决这一问题，可在高区另设独立的空调水回路，通过增设二级热交换站，利用热交换器在压力相互隔离的独立空调水回路之间实现将上、下层相互独立空调水回路之间的热量进行交换。

从结构上来分，热交换器有3种类型，即列管式、螺旋板式及板式换热器。板式换热器是近十多年来大量使用的一种高效换热器，其结构如图5.29所示。板式换热器对安装的要求相对较高，尤其是各板片组合时，密封垫片与板的配合要准确，否则易发生漏水现象，在拆开检修后更要注意这一点。

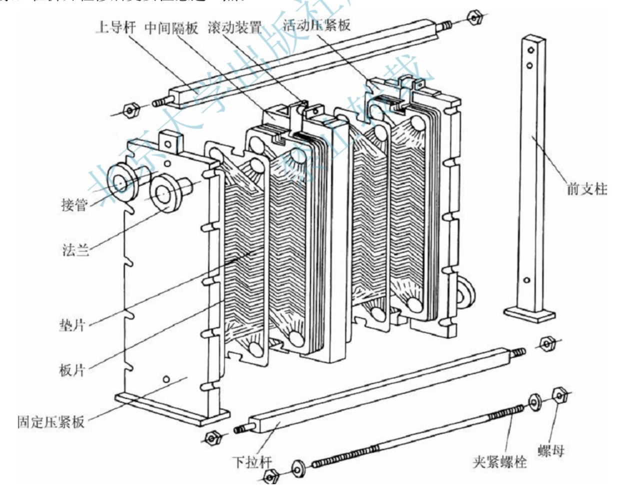


图5.29　板式换热器结构

5.7.2 热源设备的控制

1. 概述

BAS对热源进行监测与控制的主要目的是：提高系统的安全性，保证系统能够正常运行；全面监测并记录各运行参数，合理调节热力设备的运行工况，降低能源消耗，同时降低运行人员工作量，提高管理水平。

建筑空调系统的热源主要有两种获取方式，一是来自自备的锅炉，二是来自城市热网。自备锅炉一般选用燃油或燃煤锅炉，在供热量不是很大时也可选用电锅炉。

由于燃煤或燃油锅炉属于高压容器，是特种设备，国家有专门的技术规范和管理机构。同时，其本身往往配备专门的控制系统，因此，这类锅炉的运行控制一般不纳入BAS，而由其自带的控制系统完成。但BAS可以通过通信接口控制机组的启/停及调节部分控制参数。同时，也可通过接口监视一些重要的运行参数。具体可控参数的多少需要BAS承包商与锅炉机组设备厂商进行协调，取决于厂商开放数据的多少。

一般，BAS可监控的锅炉机组状态参数包括：锅炉机组启/停控制及状态监视，锅炉机组故障报警监视，锅炉机组的手/自动控制状态监视，锅炉机组进、出口蒸汽温度、压力及流量监视等。如有必要还可要求厂商开放烟气含氧量、燃料消耗量等参数供BAS读取监视。

对于电加热的空调热源锅炉和电加热的生活热水锅炉，由于其工作工艺和控制相对简单，则可以纳入BAS。

2. 监控案例分析

如图5.30所示电锅炉机组的BAS监控原理图进行热源的BAS监控案例分析。

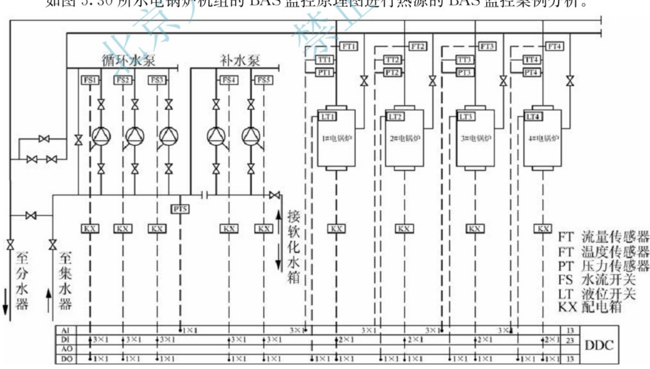


图5.30 电锅炉机组的BAS监控原理图

1）电锅炉机组的运行原理分析

电锅炉由于对周围环境没有污染，并且控制水温方便快捷，所需辅助设备少以及占地面积小，在智能大楼中越来越多地被采用。该热源系统由热水电锅炉机组、循环水泵、补水泵等组成。图5.30中共有4台电锅炉机组，系统根据建筑热负荷的情况选择运行台数。循环水泵为热水从集水器进入锅炉、再经分水器输送到用户用热终端设备的循环提供了动力。热水循环中热水的损失是不可避免的，补水泵的作用就是在需要时启动补充水量。空调热水在使用的过程中系统内存在结垢问题，为此，在补水之前应先经软化水箱进行水质处理。

2）电锅炉机组的BAS监控原理分析

（1）锅炉热水出口压力、温度、流量监测。在每台锅炉的热水出口设温度传感器（TT1～TT4），测量锅炉出口水温，可了解每台锅炉的出力状况；安装流量计（FT1～FT4），以了解每台锅炉出口热水的流量；采用压力变送器（PT1～PT4）测量热水出口的热水压力。测出的热水出口的温度、压力和流量，通过模拟量输入通道AI，送入DDC控制器显示，超限报警。

（2）锅炉补水泵的自动控制。采用压力变送器PT5测量系统回水压力，并通过1路AI通道送入DDC。当回水压力低于设定值，DDC自动启动补水泵进行补水，当回水压力上升到设定值时补水泵自动停泵。补水泵电机主电路上交流接触器的辅助触点作为开关量输入（DI信号），输入DDC，用以监测补水泵的运行状态。

（3）锅炉、给水泵的顺序启停及运行状态显示。锅炉机组设备启停通常是按照事先编制的时间假日程序控制。为保证整个系统安全运行，编程时需按照一定的顺序控制设备的启停。

① 启动顺序。循环水泵→电锅炉。

② 停止顺序。电锅炉→循环水泵。

采用水流开关（FS1～FS3）（DI信号）监测循环水泵的运行状态，当循环水泵按控制程序启动后而水流开关没有动作，则中断启动程序。电锅炉的运行状态信号取自锅炉主电路接触器的辅助触头。锅炉、循环水泵的运行状态信号通过DI通道送入DDC显示。

（4）故障报警。循环水泵、补水泵发生过载故障时，通过水泵主电路热继电器的辅助触点（DI信号）获得故障报警信号；电锅炉的故障信号（DI信号），取自加热器的断线信号。用液位计（LT1～LT4）检测锅炉锅筒水位，并送入DDC显示，水位超限报警。

（5）锅炉供水系统的节能控制。锅炉在冬季供暖时，根据分水器、集水器的供回水温度及回水干管的流量检测值，实时计算空调房间所需热负荷，按实际热负荷自动启停电锅炉及循环水泵的台数。

（6）安全保护。当由于某种原因造成循环水停止或循环量过小，以及锅炉内水温太高，出现汽化的现象时，DDC接收到水温超高的信号后，立即进入事故处理程序：恢复水的循环，停止锅炉运行，启动排空阀，排出炉内蒸汽，降低炉内压力，防止事故发生，同时响铃报警，通知运行管理人员，必要时还可通过手动补入冷水排除热水，进行锅炉降温。

（7）用电量计量。采用电能变送器计量锅炉用电量，用于锅炉房成本核算。

3）BAS 监控点位统计

请读者根据上述的分析，自行归纳统计 BAS 对电锅炉的监控点位。最后所得的监控原理图如图 5.30 所示。

5.7.3 热交换系统的控制

1. 工艺流程分析

如图 5.31 所示，热源系统设备包括锅炉机组(一次热水侧)、热交换器及热水循环(二次热水侧)3 部分。由于锅炉机组的监控不受 BAS 控制，故图左侧的热源部分没有画出锅炉机组。热交换器一端与锅炉机组的蒸汽/热水回路或城市热网相连，另一端与空调热水循环回路相连。热水循环系统的工作原理和监控内容与冷水机组冷冻水循环系统完全相同，所不同的只是冷水机组系统的冷冻水系统是与冷水机组的蒸发器发生热交换，被吸取热量；而锅炉系统的热水循环是与热交换器的蒸汽/热水回路发生热交换，吸取热量。也有许多工程热水循环侧不存在集水器与分水器，各台热交换器分区供热，在这种情况下需要对各回路分别进行控制。

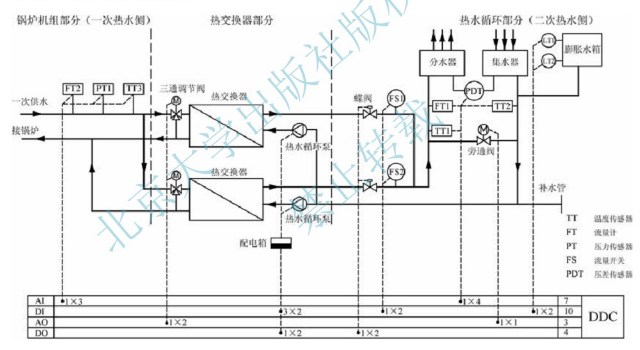


图 5.31 典型建筑物热源系统的 BAS 监控原理图

2. BAS 监控原理分析

1）热交换器部分的监控

在每台热交换器热水循环回路的进水口安装蝶阀并进行控制。每个蝶阀受 BAS 的 DDC 控制，占 DDC 的 1 路 DO 通道。

热交换器根据热水循环回路出水温度实测值(由温度传感器 TT1 测得)及设定温度，对热源侧蒸汽/热水回路的三通调节阀开度进行控制，以控制热水循环回路出水温度。BAS 对三通阀的控制需占用 DDC 的 1 路 AO 通道。

热交换器启动时一般要求先打开二次侧蝶阀及热水循环水泵，待热水循环回路启动后

再开始调节一次侧三通阀，否则容易造成热交换器过热、结垢。

2）热水循环侧的监控

监测供、回水干管的温度TT1、TT2及供水干管的流量FT1，根据热负荷计算公式$Q=c\cdot M\cdot(t_1-t_2)$来确定实际的供热量(其中，c为比热；M为总管流量；t_1、t_2分别是供、回水总管上的温度)。

循环水泵的控制：根据前24 h的室外温度平均值查算供热曲线得到要求的供热量，并算出要求的循环水量，从而确定循环水泵的开启台数。

供水温度的设定：供水温度TT1的设定值，可由调整后测出的循环水量M、要求的热量Q及实测回水温度TT2确定。随着供水温度TT1的改变，TT2也会缓慢变化，从而使要求的供水温度同时相应地改变，以保证供出的热量与要求的热量设定值一致。

热水循环系统的监控还包括压差旁通控制、膨胀水箱的液位监控、水流开关对水泵真实运行状态的监测等，这些都与冷冻水循环系统的监控相同，不再重复叙述。

3）热源侧的监控

一次热水/蒸汽的计量。蒸汽计量可以通过温度传感器TT3、压力传感器PT1、流量计FT2测量蒸汽温度、压力和流量实现。若热源提供的是蒸汽，则也可以通过测量凝结水量来确定蒸汽流量。

3. BAS监控点位统计

根据以上的监控思路，对各设备的BA点位确定如下：

1）热交换器部分的监控

2个蝶阀，计2个DO点；2个三通调节阀，计2个AO点。

2）热水循环侧的监控

2个热水循环泵的启停和状态，共计2个DO点和6个DI点；2个水流开关，用于测量水泵的实际运行状态，计2个AI点；用液位开关检测膨胀水箱的高低警戒水位，计2个DI点；设置温度传感器TT1、TT2和流量传感器FT1检测热水的供回水温度和流量，用于计算热负荷，共计3个AI点；压差传感器PDT检测供回水压差，计1个AI点；DDC据此供回水压差对旁通管上旁通调节阀的阀芯开度进行控制，从而实现压差旁通控制，计1个AO点。

最终得到的监控原理图如图5.31所示。

本章小结

智能建筑中的暖通空调系统的能耗占总能耗的一半以上，冷热源设备及相应的水系统又是暖通空调系统能耗的主要组成部分。本章专门详细介绍了冷热源设备和空调水系统设备的工艺流程和控制原理，旨在让读者理解其复杂的监控工艺和丰富的节能技术手段。

本章主要内容包括：中央空调系统中冷水机组的工艺流程、主要能耗特性和基本控制方法，冷水机组群控实现的策略和方法，BAS对水泵、风机等机电设备的控制原理，冷却水系统优化控制，冷冻水供水温度优化，以及热源设备和热交换系统的控制原理。

习　题

一、填空题

1. 冷水机组是把整个制冷系统中的压缩机、冷凝器、蒸发器、节流阀等设备以及电气控制设备组装在一起，专门为空调系统提供__________的设备。

2. 空调系统中的供热方式通常有__________或__________方式。

3. 空调水系统包括__________系统和__________系统两部分。

4. 冷却塔一般应安装在通风良好的室外，在高层民用建筑中，多放在__________。

5. 目前，BAS 对冷水机组、锅炉等带有自身完善自动控制装置的成套设备的监控以__________为主。

二、简答题

1. 空调冷(热)水系统的集水器和分水器的作用是什么?

2. 空调冷(热)水系统有哪些分类方法?

3. 参照图 5.16，绘制开式系统与闭式系统的示意图，并比较开式系统与闭式系统的优缺点。

4. 参照图 5.17，绘制同程系统与异程系统的示意图，并比较同程系统与异程系统的优缺点。

5. 参照图 5.18，绘制双管制系统、三管制系统和四管制系统的示意图，并比较双管制系统、三管制系统和四管制系统的优缺点。

6. 简述冷却水系统的工作原理和冷却塔的布置方法。

7. 什么是定水量系统和变水量系统?

8. 压差旁通阀的作用是什么?

9. 二次泵变水量空调水系统与一次泵变水量空调水系统有什么区别?

10. 利用 AutoCAD 绘制图 5.13 所示的冷冻站 BAS 监控原理图。

11. 对于冷水机组、水泵、冷却塔风机等监控对象，BAS 通过 DDC 是怎样对其实现监控的?

12. 理解图 5.14 所示典型电气设备启/停监控电气原理图。

13. BAS 是怎样实现对冷水机组运行台数控制的?

14. BAS 对冷水机组实现群控的目的是什么? 并请叙述启动和停止一台制冷机的策略。

15. BAS 是怎样实现压差旁通控制的?

16. 水流开关的作用是什么?

17. 冷源及水系统的节能控制主要通过哪些途径来完成?

18. 利用 AutoCAD 绘制图 5.31 所示的典型建筑物热源系统的 BAS 监控原理图。

19. 理解图 5.31 所示的典型建筑物热源系统 BAS 监控原理图。

20. 理解图 5.31 所示的电锅炉机组的 BAS 监控原理图。

21. 简述冷冻水回路二次水泵变频的控制方案。

22. 理解图 5.25“BAS 对二级泵系统的监控”，并请问 BAS 是怎样调整加压泵开启台数或通过变频器改变其转速的？

23. 绘制并理解图 5.28 所示的冷却水系统的 BAS 监控原理图。

24. 如图 5.32 所示选自《Alerton 楼控系统设计手册》中的热交换站监控原理图，请阅读、分析和学习。

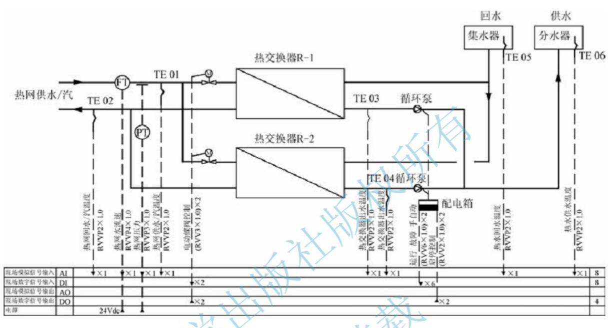


图 5.32　热交换站监控原理图(选自《Alerton 楼控系统设计手册》)



第6章

其他建筑设备的控制

教学目标

了解智能建筑供配电系统结构、照明系统结构，熟悉供配电监控系统、照明监控系统、电梯监控系统的主要功能，掌握供配电监控系统、照明监控系统、电梯监控系统的工作原理，能进行供配电监控系统、照明监控系统、电梯监控系统的初步设计。

教学步骤

能力目标	知识要点	权重	自测分数
了解智能建筑供配电系统的基本结构、了解照明系统的控制方式，了解电梯系统的控制原理	供配电系统的接线方式	10%	
	传统照明控制方式	10%	
	电梯自动控制原理	5%	
熟悉供配电、照明、电梯监控系统的主要功能	供配电系统的监测内容	10%	
	照明系统自动控制模式	10%	
	电梯监控系统的监测内容	10%	
掌握供配电、照明、电梯监控系统的工作原理	供配电监控系统工作原理	20%	
	照明监控系统的工作原理	15%	
	电梯监控系统的工作原理	10%	

▶▶章节导读

通过前面章节的学习，我们对智能建筑有了进一步的认识，了解了建筑设备自动化系统对于智能建筑的重要意义。通过学习，我们知道了建筑设备自动化系统如何对暖通空调和给排水进行监控。暖通空调监控系统、给排水监控系统的应用不仅提高了管理水平和管理效率，更重要的是有效降低了建筑物的能耗。实际上在智能建筑中，除了暖通空调、给排水外，照明、电梯也是耗能大户。据统计，建筑照明和电梯能耗占智能建筑总能耗的15%以上，因此，建筑设备自动化系统除了对暖通空调、给排水等进行监控外，还有必要对建筑照明和电梯进行监控，从而达到建筑节能的目的。另外，由于智能建筑的供电可靠性要求较高，为了对楼宇供配电系统进行有效管理，提高供电可靠性，因此建筑设备自动化系统也需要对建筑供配电系统进行监控。本章从系统结构、控制方式、监控原理、监控内容等方面对建筑供配电监控系统、照明监控系统和电梯监控系统进行介绍，使读者对这三个子系统有较全面、较深入的认识。



引例

随着我国经济的快速发展和技术水平的不断提高，智能建筑在我国的发展十分迅速。目前我国新建的建筑基本上都实现了不同程度的智能化，通常建筑物的规模以及用途是决定其智能化程度高低的重要因素，像大型酒店、写字楼、商业中心等建筑其智能化程度都很高，一般都安装了楼宇设备自动化系统，而像小区住宅楼等建筑，其智能化程度相对较低，一般安装建筑设备自动化系统的不多。建筑设备自动化系统最基本的监控对象包括暖通空调、给排水、供配电、建筑照明和电梯等机电设备。上述这些机电设备都是建筑耗能大户，其消耗的能源占整个建筑物的90%以上。因此，建筑设备自动化系统的重要作用之一就是尽量始终使机电设备在高效合理的状态下运行，以最大限度地节约整个建筑物的运行能耗。

供配电系统是智能建筑最主要的能源来源，对电能起着接收、变换和分配的作用，为智能建筑内的各种用电设备提供电能，是其不可缺少的最基本的建筑设备。为确保用电设备的正常运行，必须保证供电的可靠性。另外，从节约能源的角度看，电力供应管理和设备节电运行也离不开供配电系统的监控管理。因此，对建筑供配电系统进行监控很有必要。和常规的供配电系统相比，供配电监控系统应能自动、连续、实时地监控所有变、配电设备的运行、故障状态和运行参数，还应具有故障的自动应急处理能力。

随着人民生活水平的不断提高，人们对工作和生活环境的要求越来越高，同时对照明系统的要求也越来越高，传统照明技术受到了强烈冲击。一方面，由于信息技术和计算机的发展对照明技术的变化提供了技术支撑；另一方面，由于能源的紧缺，各个国家对照明节能越来越重视，新型的照明技术得以迅速发展，以满足使用者节约能源、舒适性、方便性的要求。

美国从2000年起投资5亿美元实施“国家智能照明计划”。美国能源部预测，到2010年前后，美国将有55%的白炽灯和荧光灯被半导体灯具替代，每年仅节电就可达350亿美元。世界著名的印制电路板生产公司、奥地利的AT&S也积极开发LED用于印制电路

板，并打算将该类印制电路板作为未来的支柱产品。韩国政府则在实施将路灯更换成智能照明系统的计划。欧盟已经规定，自2009年9月1日起，所有超市不允许销售白炽灯泡，也不允许销售高压的荧光灯灯泡，只能销售节能灯。我国自1997年启动绿色照明工程以来，通过技术创新，引进国外技术和设备，在智能照明方面成绩显著。

在上海世博会上，大家见识到了不同的馆区不同的国家有着不同的风采，但是，不管是美国馆、加拿大馆、文化中心还是上汽通用汽车馆，都有一个共同点，那就是室内照明全部采用被称为“21世纪绿色光源”的智能照明系统。由此可见，智能照明已经成为全球各国各行业的照明方面的共识。

采用智能照明控制系统，不仅能提升照明环境的舒适性，而且能有效节约能源，降低用户运行费用，提高大楼管理水准，具有极大的经济意义和社会效益。因此，照明系统的智能化控制已成为建筑设备自动化系统不可分割的组成部分，而且应用范围越来越广。



案例小结

通过对建筑照明系统进行智能化控制，一般可以节约20%～40%的电能，其节能效果显著。而对于建筑供配电系统、电梯系统，建筑设备自动化系统通常只对其运行状态进行监测、故障报警，并不进行直接控制。

6.1 供配电系统控制

智能建筑供配电系统的安全、可靠运行对于保证智能建筑内人身和设备财产安全，保证智能建筑各子系统的正常运行，具有极其重要的意义。建筑自动化系统对供配电系统的监控除了确保大厦的整个供配电系统的正常运行外，还可以大大提高系统的工作效率，节省能源消耗。

6.1.1 供配电系统认知

1. 电力系统的基本概念

电能是国民经济各部门和社会生活中的主要能源和动力，是应用非常广泛的二次能源。电能可以比较容易地从其他形式的能量转换而得，又能很方便地转变成其他形式的能量，并可以很经济地远距离传输。电能的控制、分配、测量都很方便。

建筑物所需电能由电力系统提供，由于发电厂距用户较远，需要通过输电线路和变电所等中间环节，才能把电力输送给用户。同时，为了提高供电的可靠性和实现经济运行，常将许多的发电厂和电力网连接在一起并联运行。所谓电力系统就是由各种电压等级的输电线路将发电厂、变电所和电力用户联系起来的一个发电、输电、变电、配电和用电的整体电子系统如图6.1所示。

1） 电力网或电网

电力系统中各电压等级的电力线路及其联系的变电所称为电力网或电网。电网通常分为输电网和配电网两大部分。由35kV及以上的输电线路和与其相连接的变电所组成的部

分称为输电网，其作用是将电力输送到各个地区或直接供电给大型用户。35kV以下的输电线路称为配电网，其作用是直接供电给用户。

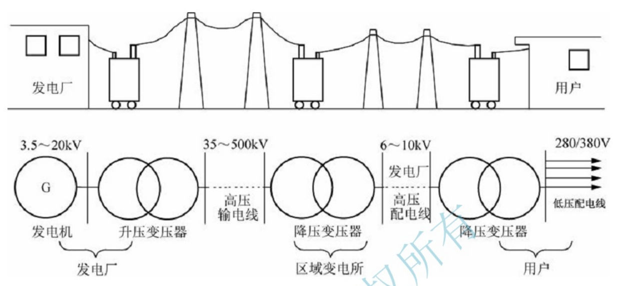


图6.1 电力系统

电力线路是输送电能的通道。由于发电厂与电能用户相距较远，所以要用各种不同电压等级的电力线路将发电厂、变电所与电能用户之间联系起来，使电能输送到用户。一般将发电厂生产的电能直接分配给用户或由降压变电所分配给用户的10kV及以下的电力线路称为配电线路，而把电压在35kV及以上的高压电力线路称为送电线路。

2）变电所

变电所是接受电能、变换电压和分配电能的场所，可分为升压变电所和降压变电所两大类。为了实现电能的经济输送和满足用电设备对供电质量的要求，变电所需要对发电机的端电压进行多次变换。

3）配电所

引入电源不经过变压器变换，直接以同级电压重新分配给各变电所或供给各用电设备的场所称为配电所。

建筑中由于安装了大量的用电设备，电能消耗量大，为了接受和使用来自电网的电能，内部需要一个供配电系统，该系统由高压供电系统、低压配电系统、变配电所和用电设备组成。通常情况下，大型建筑或建筑小区的电源进线电压多采用10kV，电能先经过高压配电所，再由高压配电所将电能分送给各终端变电所。经配电变压器将10kV高压降为一般用电设备所需的电压(220/380V)，然后由低压配电线路将电能分送给各用电设备使用。

2. 智能建筑供配电系统

1）智能建筑的负荷等级划分

由于智能建筑用电设备多、负荷大、对供电的可靠性要求高，因此应对负荷进行分析，合理、准确地划分负荷等级，从而使智能建筑的供配电系统设计更加科学、合理。负荷等级划分的原则主要是根据中断供电后在政治、经济上造成损失或影响的程度而定。按照国标《供配电系统设计规范》(GB 50052—1995)的规定，负荷等级的划分标准如下。

（1）一级负荷。中断供电将造成人身伤亡者；中断供电将造成重大的政治影响者；中断供电将造成重大的经济损失者；中断供电将造成公共场所的秩序严重混乱者。一级负荷应由两个电源供电，一用一备，当一个电源发生故障时，另一个电源应不致同时受到损坏。一级负荷中的特别重要负荷，除上述两个电源外，还必须增设应急电源。为保证对特别重要负荷的供电，禁止将其他负荷接入应急供电系统。常用的应急电源可有以下几种：独立于正常电源的发电机组、供电网络中有效地独立于正常电源的专门馈电线路、蓄电池等。

（2）二级负荷。中断供电将造成较大政治影响者；中断供电将造成较大经济损失者；中断供电将造成公共场所的秩序混乱者。对于二级负荷，要求采用两个电源供电，一用一备，两个电源应做到当发生电力变压器故障或线路常见故障时不致中断供电(或中断供电后能迅速恢复)。在负荷较小或地区供电条件困难时，二级负荷可由一路6kV及以上的专用架空线供电。

（3）三级负荷。凡不属于一级和二级的负荷，均属于三级负荷。三级负荷对供电电源无要求，一般为一路电源供电即可，但在可能的情况下，也应提高其供电的可靠性。

在智能楼宇用电设备中，属于一级负荷的设备有：消防控制室、消防水泵、消防电梯、防排烟设施、火灾自动报警、自动灭火装置、火灾事故照明、疏散指示标志和电动的防火门窗、卷帘、阀门等消防用电设备；保安设备；主要业务用的计算机及外设、管理用的计算机及外设；通信设备；重要场所的应急照明。属于二级负荷的设备有：客梯、生活供水泵房等。空调、照明等属于三级负荷。

2）智能建筑用电设备的特点

智能建筑通常是高层建筑，与一般建筑相比，其用电设备具有如下的特点。

（1）用电设备种类多，有电气照明设备、电梯设备、给排水设备、冷热源设备、洗衣房设备、厨房设备、暖通空调设备、消防用电设备以及弱电设备等。

（2）用电量大，且负荷密度高。智能建筑的用电负荷比较集中，一般情况下，空调用电负荷约占总用电量的50%，照明负荷约占总用电量的20%～30%，电梯、水泵以及其他动力设备约占总用电量的25%～35%。一般，像高层旅游宾馆和酒店、高层商住楼、高层写字楼等智能建筑的负荷密度都在60W/m^{2}以上，有的高达150W/m^2。

（3）供电可靠性要求高。智能建筑中有相当数量的负荷属于一级负荷，如消防用电等。所以智能建筑供电可靠性要求高，一般均要求有两个及两个以上的高压供电电源，并设置柴油发电机组(或燃气发电机组)作为备用电源。

（4）电气线路多，电气系统复杂。由于智能建筑的功能比较复杂、用电设备种类多、供电负荷多且可靠性要求高，导致智能建筑的电气系统很复杂。电气系统复杂了，电气线路也就多了。不仅有高压供电线路、低压配电线路，而且还有火灾报警线路、防盗报警线路等弱电系统线路。

3）智能建筑用电设备分类

智能建筑的用电设备很多，根据用电设备的功能可将其分为3类：保安型、保障型和一般型。

(1) 保安型负荷。保证大楼内人身安全及智能化设备安全、可靠运行的负荷。这类负荷有：消防负荷、通信及监控管理用计算机系统等用电负荷。

(2) 保障型负荷。保障大楼运行的基本设备负荷。这些负荷有：主要工作区的照明、插座、生活水泵、电梯等。

(3) 一般负荷。除上述负荷以外的负荷，如：一般的电力、照明、暖通空调设备、冷水机组、锅炉等。

4) 智能建筑供配电系统的特点

(1) 由于用电量大，一般供电电压都采用10kV标准电压等级，有时也可采用35kV，变压器装机容量大于5000kVA，并设内部变配电所。

(2) 按照《高层民用建筑设计防火规范》的有关要求，为了确保智能建筑消防设施和其他重要负荷用电，智能高层建筑一般要求两路或两路以上独立电源供电，当其中一个电源发生故障时，另一个电源应能自动投入运行，不至同时受到损坏。另外，还须装设应急备用柴油发电机组，要求在15s内自动恢复供电，保证事故照明、电脑设备、消防设备、电梯等设备的事故用电。

(3) 高层建筑的用电负荷一般可分为空调、动力、照明等。动力负荷主要指电梯、水泵、排烟风机、洗衣机等设备。普通建筑的动力负荷都比较小，且一般大部分放在建筑物的底部，因此变压器一般也都设置在建筑物的底部。但是随着建筑高度的增加，在超高层建筑中，电梯设备较多，电梯负荷随之增大，此类负荷大部分集中于大楼顶部。水泵容量也随着建筑的高度增大，竖向中段层数较多，通常设有中间泵站。在这种情况下，为了减少变配电系统的电能损失，采用变压器深入负荷中心的方式，宜将变压器按上、下层配置或者按上、中、下层分别配置，变压器进入楼内而且上楼。供电变压器的供电范围大约为15～20层。如日本的新信心大厦共60层，变压器配置在地下4层和地面40层；纽约的帝国大厦共102层，变压器配置在地下2层、地面41层及84层。

(4) 为了减少变压器台数，单台变压器的容量一般都大于1000kVA。由于供电深入负荷中心，变压器进入楼内，为了防火的需要，不能采用一般的油浸式变压器和油断路器等在事故情况下能引起火灾的电气设备，而采用干式变压器和真空断路器。

5) 智能建筑的高压主接线

变电所中承担输送和分配电能任务的回路被称为主电路或主接线。主接线上的设备被称为一次设备，包括变压器、断路器和互感器等。

智能建筑具有电气设备多、人员密度大、火灾隐患多、对消防安保要求高、用电负荷大等特点，对供电可靠性及供电质量要求都很高，因此，智能建筑供电系统一般采用双电源供电。智能建筑供电系统常用高压主接线方案如图6.2所示。

图6.2(a)采用双电源供电，正常工作时双电源同时供电，各带50%的负载，母线联络开关(也称母联开关)断开；当一路电源出现故障时，母联开关自动闭合，全部负荷由正常电源供电。由于增加了母线联络开关柜和电压互感器柜，因此变电所的面积也相应增大。

这种接线方式具有单母线分段、自动切换、互为备用的特点，可保证较高的供电可靠性，是智能建筑最常用的高压主接线方式。

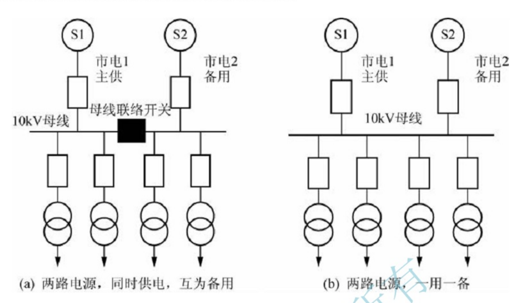


图 6.2　智能建筑供电系统常用高压主接线方案

图 6.2(b)采用双电源供电，正常工作时由一路电源供电，另一路停止，处于备用状态；当正常工作电源出现事故停电时，备用电源自动投入。这种接线方式结构简单，节省了母线联络开关柜和电压互感器柜，有利于节省投资和减小高压配电室的建筑面积，但要求两路都能保证 100%的负荷用电，并且当清扫母线或母线故障时，将会造成全部停电。因此，这种接线方式常用在大楼负荷较小，供电可靠性要求相对较低的建筑中。

6）自备应急柴油发电机组

目前城市电网的供电状况虽然较稳定，但对一个建筑物来说，即使城市电网已提供两路电源，并且有时这两路电源来自不同的上一级变电站，但实际运行中，一路电源检修时不排除另一路电源出现故障的情况，而且还有可能两路电源同时出现故障(因为再上级电源往往是同一电源)。因此，为了确保大厦供电的可靠、安全，设置自备柴油发电机组是必要的。

自备应急柴油发电机组应始终处于准备启动状态。当市电中断时，机组应立即启动，并在 15s 内启动且供电；当市电恢复后，机组延时 2～15min(可调)不卸载运行，延时时间到后主开关自动跳闸，机组再空载冷却运行 10min 后自动停车。

7）智能建筑的低压主接线

智能建筑变配电所的低压主接线一般采用分段单母线接线方式，母联开关手动或自动切换。低压配电的接线方式可分为放射式和树干式两大类。放射式配电的特点是每个负荷由单一线路供电，因此发生故障时影响范围小，可靠性高，控制灵活，易于实现集中控制，但缺点是线路多，所用开关设备多，投资大，因此多用于供电可靠性要求较高的设备。例如大型消防泵、生活水泵和中央空调的冷冻机组，供电可靠性要求高，且单台机组容量较大，通常都采用放射式专线供电。

树干式配电是一独立负荷或一集中负荷按它所处的位置依次连接到某一条配电干线上。树干式配电所需配电设备及线缆消耗量较少，但干线发生故障时影响范围大，所以供电可靠性较低，且在实现自动化方面适应性较差。树干式配电一般适用于用电设备比较均匀，容量不大，又无特殊要求的场合。

目前智能建筑低压配电方案是：在干线上基本采用放射式，而楼层间配电则为混合式。混合式即放射式与树干式的组合方式。如图 6.3(a)(c)所示低压配电接线方案，分别为放射式、树干式和混合式接线图。

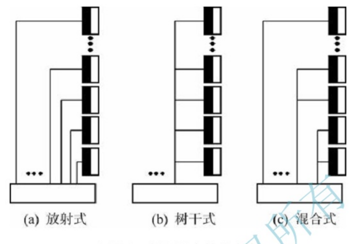


图 6.3　低压配电接线方案

特别提示

与传统建筑物相比，智能建筑对供配电系统的可靠性要求更高，因此，在进行智能建筑供配电系统设计时，应充分考虑系统结构、接线方式等对供电可靠性的影响。

6.1.2　供配电系统的控制

在智能建筑中，供配电监控系统是 BAS 的一个子系统，它应能够直接接收来自现场设备的各种监测信号，产生控制信号并直接作用于现场设备，而且应具有一定的记录、显示、处理及报警功能，同时还必须能够与上位计算机进行信息交换。如图 6.4 所示高层建筑供电系统监控示意图。

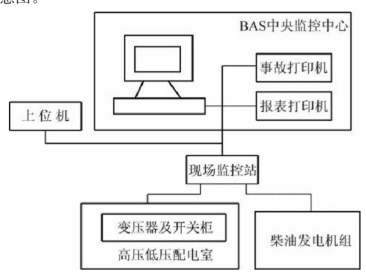


图 6.4　高层建筑供电系统监控示意图

供配电监控系统的主要任务是对供配电系统中各种设备的状态和供配电系统的有关参数进行实时的监视、测量，并通过计算机处理、显示、打印、存储及分析使用，使 BAS 管理中心能够及时了解供配电系统运行的情况，完成对各种重要的供配电设备的监测与管理。

1. 供配电监控系统的监控原理

供配电监控系统的监控对象为高低压系统、直流系统、变压器、备用发电机系统的相关设备的运行状态控制，以及系统电压、电流、功率、功率因数等参数的监测。高压线路的电压电流测量方法如图 6.5 所示(对低压线路的电压电流测量方法与之类似，只是电压和电流互感器的电压等级不同)。监测的信号由电流互感器、电压互感器获得，经过变送器转换，输出 0～5V、0～10V 的标准模拟量信号送入现场控制器的 AI 端子。电气设备的运行状态通过被测设备的辅助触点转换为 ON/OFF(1/0)信号直接送往 DDC 的 DI 端子。功率因数的检测可通过测量电压与电流的相差得到，有了功率因数、电压、电流数值即可间接求得有功功率和无功功率。

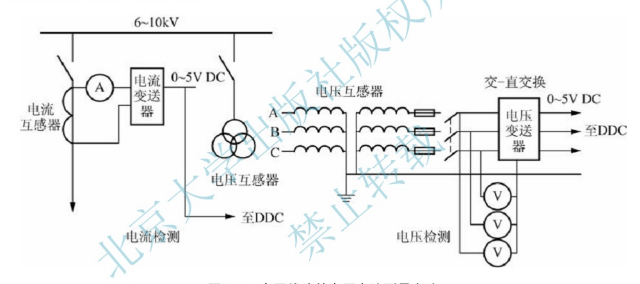


图 6.5　高压线路的电压电流测量方法

另外也可采用多参数电力监测仪实现电力参数的测量。该装置是目前广泛使用的一种智能化检测装置，只需简单地接入三相电源中，从不同的端子上即可输出各种电力参数，如电压、电流、频率、功率因数、谐波和电度。它还可以提供计量参数、监视、能量管理等功能，同时它还提供多种通信接口，可以作为网络的一个结点与其他计算机进行通信。

在楼宇中供配电监控系统主要有两种构成方式：对于中、小型楼宇供配电系统，一般直接利用通用的 DDC、PLC 和各种变送器对供配电系统进行监视，其检测信号直接传至建筑设备自动化系统；对于一些大型楼宇供配电系统，用户往往要求采用专业的能源监控管理系统对其进行监控和管理，这类系统往往自成体系，具有自己的通信网络和监控管理工作站，通过通信接口与整个建筑设备自动化系统进行数据交换。目前电力设备监控中采用得比较多的能源监控管理系统有 ABB、通用电气(GE)、金钟-默勒(Moller)、溯高美、施耐德等公司的产品。

2. 供配电监控系统的监测内容

1） 高压供电系统的监测

高压供电系统的监测内容包括：高压进线主开关的分合状态及故障状态监测，高压进线三相电流监测，高压进线电压、频率、功率因数监测，电度计量等。

以上参数送入供配电监控系统或上级控制中心，由系统自动监视及记录，为中心的电力管理人员提供高压供电系统运行的数据，监视主开关的状态，发现故障及时报警。同时监视记录楼宇的用电负荷变化情况，便于今后统计分析。

2） 低压配电系统的监测

低压配电系统的监测内容包括：变压器二次侧主开关的分合状态及故障状态监测，变压器二次侧主开关电流、电压、功率及功率因数监测，母联开关的分合状态及故障状态监测，母联的三相电流监测，各低压配电开关的分合状态及故障状态监测，各低压配电出线的三相电压、电流、功率及功率因数监测等。

低压配电的供电对象有冷水机组、照明、泵类、电梯等。监测的这些参数对楼宇的管理工作非常重要。基于这些参数，可以分析楼宇内各主要用电设备的运行与用电情况，为有效地管理提供帮助。

中央控制中心计算机配有专用监控软件，管理人员可通过计算机显示了解整个供配电系统的状况，监视各主要开关的分合状态及故障状态。若系统出现问题，管理人员可立即发现，并确定故障位置，从而及时处理问题。

如图 6.6 所示低压配电系统监控原理图，该监控系统由现场设备即电流变送器、电压变送器、功率因数变送器、有功功率因数变送器等各类传感器以及现场控制器(即 DDC)组成。DDC 通过电流变送器、电压变送器及功率因数变送器等现场检测设备自动检测电压、电流和功率因素等参数，与额定值比较，发现故障时报警，显示相应的电压、电流数值和故障位置，并送至中央监控中心统一管理。

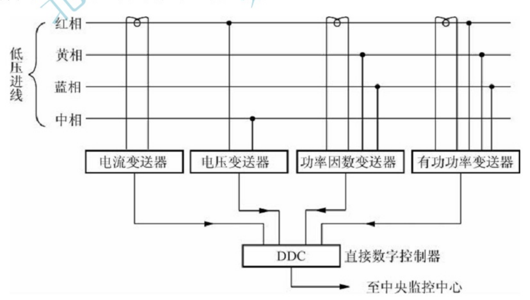


图 6.6　低压供配电系统监控原理图

3） 变压器的监测

变压器监测内容包括：变压器温度监测，风冷变压器风机运行状态监测，油冷变压器油温及油位监测等。

对变压器的监测主要是确保其在正常的温度下工作，当变压器温度超过正常值时进行报警。对干式变压器散热风机的运行状态及油冷式变压器油温、油位的监测有助于分析变压器温度超常的原因，提前发现故障。

4） 备用电源的监测

高层智能建筑为保证消防泵、消防电梯、紧急疏散照明、防排烟设施和电动防火卷帘门等消防用电供电的可靠性，需要自备应急柴油发电机组作为应急电源。通常，电力设备监控系统不对应急柴油发电机组及切换开关进行控制。但为保障机组的正常运行，需对一些有关参数进行监测，如机组运行状态，故障报警，油箱油位，各开关的状态，电流、电压及频率等，从而有助于系统的正常运行及故障排除。应急柴油发电机组的监测原理如图 6.7 所示。

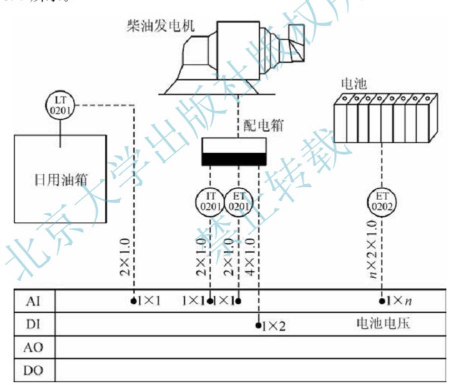


图 6.7 应急柴油发电机组的监测原理

IT—电流变送器；ET—电压变送器；LT—液位传感器/变送器

5） 直流操作电源监测

直流蓄电池组的作用是产生直流 220V、110V、24V 直流电。它通常设置在高压配电室内，为高压主开关操作、保护、自动装置及事故照明等提供直流电源。为保证直流电源正常工作，电力设备监控系统监视各开关的状态，尤其要对直流蓄电池组的电压及电流进行监视及记录，若发现异常情况及时处理。

3. 供配电监控系统的控制功能

供配电监控系统可对系统的主开关、断路器等设备的工作状态进行自动控制。系统通常根据自身监测到的现场信号或接收上级计算机发出的控制命令，对供配电系统设备实施操作，即由控制系统产生开关量输出信号，通过接口单元驱动某个断路器或开关设备的操作机构来实现供配电回路的接通或分断，这些任务应由专用设备完成。要实现上述功能，通常应包括以下几方面的内容。

(1) 高低压断路器、开关设备按顺序自动接通、分断，高、低压母线联络断路器按需要自动接通、分断。

(2) 柴油发电机组备用电源的开关设备按顺序自动投入或自动脱离，即由开关设备的自动分、合闸实现备用电源与市电供电的转换。

(3) 大型动力设备定时启动、停止及顺序控制。

(4) 现场监控站的监控器根据用电量的统计与分析，通过预先编制的程序对用电高峰和低谷用电状况下变压器投入的台数进行合理的控制，提高变压器的利用率；通过监控装置中计算机软件对用户电量的监测、分析、预测，对系统负荷做相应的控制与调整，最终达到节能的目的。

特别提示

目前智能建筑供配电监控系统主要以监测为主，控制为辅。各类控制、保护及联动功能一般仍在各开关柜、变压器、配电箱内部实现或由人工就地控制。

6.1.3 供配电监控系统工程应用

目前，许多工程不将供配电系统的高压部分纳入建筑设备自动化系统的监控管理范围，这一方面是由于高压侧的许多参数是应该由电力部门负责保证的，无需各楼宇独立进行管理；另一方面，高压侧监控设备安装困难、危险性大，需要与电力部门进行多方面的协调。因此，如需监控，高压侧除开关柜的运行及故障状态利用干节点直接监控外，其他参数一般通过网络从专业的电力管理系统中读取。

在大多数工程中，对发电机组及直流操作电源的监控不由建筑设备自动化系统直接完成。如需监控，可通过网络与发电机组控制器及专业电力管理系统进行通信。

由此可见，目前工程中建筑设备自动化系统对供配电系统的监控，主要是对系统变压器及低压配电部分监控功能的实现。如图6.8所示典型低压配电系统监控原理图。图中对开关的分合状态及电流、电压、功率因素等参数进行监视，而并未对开关的分合进行控制。

下面以施耐德PowerLogic变配电监控系统为例，说明专业电力监控系统在变配电工程中的应用情况。

施耐德PowerLogic是具有安全、高效、经济、可扩展性的10/0.4kV变配电计算机监控管理系统。该系统基于分层分布式结构，采用现场总线技术实现变配电系统信息的交换和管理。系统集保护、控制、测量、信号采集、故障录波、谐波分析、电能质量管理、

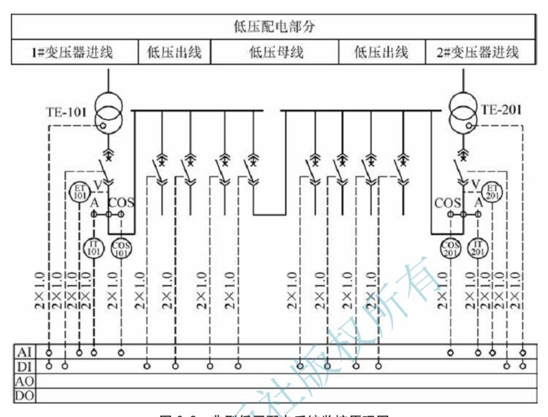


图 6.8 典型低压配电系统监控原理图

IT—电流变送器；ET—电压变送器；COS—功率因数变送器

负荷控制和运行管理为一体，实现了变配电系统高、低压电气设备分散监控和集中管理的功能，真正实现了配电室的无人值守，全面提高了变配电运行现代化管理水平。施耐德变配电监控系统结构图如图 6.9 所示。

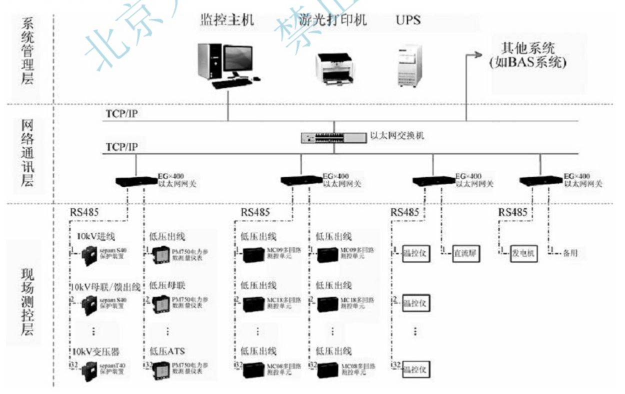


图 6.9 施耐德变配电监控系统结构图

1. 系统组成

系统采用分层分布式设计，网络结构简洁清晰，具有良好的可扩展性，通信接口规范，能够与各种自动化系统和智能设备实现网络通信，支持多种通信协议(如：MODBUS、PROFIBUS DP、IEC－60870－5－101/103 等)，通信介质采用双绞线或光纤。系统从功能上可分为三层：现场监控层、通信管理层和系统管理层。

(1) 现场监控层。采用施耐德电气的 Sepam 系列微机保护测控装置、Micrologic 系列低压智能控制单元和 PM800 系列电力参数测量仪作为监控单元，所有监控单元均为标准化、模块化结构，彼此相对独立。每个监控单元按一次设备对应分布式配置，就地安装在开关柜回路内，完成保护、控制、监测和通信等功能，同时具有动态实时显示开关设备工作状态、运行参数、故障信息和事件记录、保护定值等功能。监控单元与开关柜融为一体，构成智能化开关柜，经 RS485 通信接口接入现场总线。

(2) 通信管理层。完成监控层和管理层之间的网络连接、转换和数据、命令的交换，通过以太网可实现系统与办公信息管理系统(MIS)、建筑设备自动化系统(BAS)和智能消防管理系统(FAS)等自动化系统的网络通信，达到信息资源的共享。系统还具备与模拟显示屏、智能直流电源系统、柴油发电机组、变压器温控单元等其他智能设备的通信接口。

(3) 系统管理层。由监控主机、大屏幕彩显、打印机、UPS 电源等组成。监控主机采用高性能计算机，选用专业组态监控软件完成变配电系统的全部监控和管理功能，系统软件采用基于多进程、多任务的 Microsoft Windows 操作系统。

变配电数据通过现场监控层进行分散采集和就地显示，经过变配电通信管理层的协议转换，最终由系统管理层实现集中的管理。

2. 系统主要功能

(1) 显示和统计打印功能。实时动态显示配电系统主接线图；动态刷新显示电气测量参数、运行参数和状态量参数；连续记录显示负荷曲线、电压棒图或饼图等；顺序记录显示保护动作和开关跳、合闸等事件；查询显示打印历史事件、负荷曲线、历史曲线；召唤显示打印日、月、年运行报表和各种统计报表。

(2) 事件报警和记录功能。当出现开关事故变位、遥测越限、保护动作和其他报警信号时，系统能发出音响提示，并在屏幕报警框内显示报警内容，报警事件经操作员确认后能手动复位，所有报警事件可打印记录和写盘保存。

(3) 控制操作和记录功能。操作人员可通过监控主机对受控对象进行操作，系统具有严格的密码保护系统，控制操作具有操作权限等级管理功能，对于每次遥控操作，系统均对操作人、操作时刻及操作类型进行记录，自动生成遥控操作记录，并将记录存盘。

(4) 数据采集和处理功能。系统能对模拟量、开关量进行实时和定时数据采集，所有的电气量均采用交流采样，并保证高精度和高速度，对重要历史数据进行处理并存入数据库。

(5) 在线维护和修改功能。各类画面、报表的在线编辑功能；数据库部分内容的在线修改；部分运行参数及限制值的在线设置和状态修改；主接线图及运行报表的制作及编辑。

(6) 电能管理功能。通过对系统数据的分析并进行成本核算，得到电能消耗模式并识别出主要的耗电源，帮助用户有效地管理负荷以控制波峰电价时的用电，减少非正常耗电，最终实现高效节能。

(7) 系统自检功能。系统具有良好的自检功能，能在线检测系统所有软件和硬件的运行状态，当发现异常及故障时能及时根据故障性质自动判别是否需要闭锁有关功能或设备，并记录和显示报警信息。

采用变配电监控系统，可使变配电系统的运行更安全、可靠、经济和直观，全面实现了变配电系统的"四遥"及无人值守(或少人值班)，节约了人力资源，提高了管理效率及管理水平。"四遥"功能，即遥测、遥控、遥信、遥视。

① 遥测是指通过系统通信采集器、监测模块以及电力组态软件实现变配电站所有回路的电量采集，即电流、电压、有功功率、无功功率、视在功率、有功电度、无功电度、视在电度、功率因数、频率等。

② 遥信是指通过系统通信采集器、监控模块以及电力组态软件实现变配电站中所有开关量的采集，如断路器的分合闸、手车工作位置、电机储能状态、变压器风机运行状态、高温报警信号、超高温跳闸信号、断路器故障信号、事故跳闸信号、综合保护器的故障类型以及变压器门开关信号等开关量。

③ 遥控是指通过系统通信采集器、监控模块以及电力组态软件实现带有电动操作机构的框架式断路器和分励脱扣的塑壳断路器以及接触器等远程控制功能。

④ 遥视(预选)通过视频采集器、视频通信以及组态软件实现变配电所监视功能，以防止非法人员进入。

特别提示

专业变配电监控系统对电量信号的采集是采用专用电量仪表，而不是变送器，采集的是各供电回路的波形变化，其信息量和精确程度都远远超过变送器。系统通信设备具有很强的抗干扰能力，其软件也是电力系统专业组态软件。

6.2 照明系统监控

电气照明系统是建筑物的重要组成部分之一。照明的基本功能是保证安全生产、提高劳动效率、保护视看者视力健康和创造一个良好的人工视觉环境。在一般情况下，照明是指以"明视条件"为主的功能性照明。在那些突出建筑艺术效果的厅堂内，照明的装饰功能加强，成为以装饰为主的艺术性照明。因此照明设计的优劣除了影响建筑物的功能外，还直接影响建筑的艺术效果。

室内照明系统由照明装置及其电气设备组成。照明装置主要是指灯具，照明电气设备包括电光源、照明开关、照明线路及照明配电箱等。

6.2.1 建筑照明系统认知

1. 照明的分类

1）按照明范围分类

（1）一般照明。在整个场所或场所的某个特定区域照度基本上均匀的照明称为一般照明。对于工作位置密度大而对光照方向又无特殊要求，或工艺上不适宜装设局部照明装置的场所，宜单独采用一般照明。例如办公室、体育馆及教室等。

（2）局部照明。局限于工作部位有特殊要求的、固定或移动的照明。这些部位对高照度和照射方向有一定要求。对于局部地点需要高照度并对照射方向有要求时，宜采用局部照明。但在整个工作场所不应只设局部照明而无一般照明。

（3）混合照明。一般照明与局部照明共同组成的照明。对于工作面需要较高照度并对照射方向有特殊要求的场所，宜采用混合照明。此时，一般照明照度宜按不低于混合照明总照度的5％～10％选取，且最低不低于20Lx。例如金属机械加工机床、精密电子电工器件加工安装工作桌及办公室的办公桌等。

2）按照明功能分类

（1）工作照明。正常工作时使用的室内外照明称为工作照明。它一般可单独使用，也可与应急照明、值班照明同时使用，但控制线路必须分开。

（2）应急照明。应急照明包含三部分内容：正常照明因故障熄灭后，供继续工作或暂时继续工作的照明称为备用照明；为确保处于危险之中的人员安全的照明称为安全照明；发生事故时保证人员安全疏散时的照明称为疏散照明。在因工作中断或误操作容易引起爆炸、火灾以及人身事故会造成严重政治后果和经济损失的场所，应设置应急照明。应急照明宜布置在可能引起事故的设备、材料周围以及主要通道和出入口，并在灯的明显部位涂以红色，以示区别。应急照明通常采用白炽灯(或卤钨灯)。应急照明必须采用能瞬时点燃的可靠光源。

（3）值班照明。在非工作时间内供值班人员使用的照明称为值班照明。可利用工作照明中能单独控制的一部分，或利用应急照明的一部分或全部作为值班照明。

（4）警卫照明。用于警卫地区周界附近的照明。可根据需要在需警戒的区域设置。

（5）障碍照明。装设在建筑物上作为障碍标志用的照明称为障碍照明。在飞机场周围较高的建筑上，或船舶通行的航道两侧的建筑上，应按民航和交通部门的有关规定装设障碍照明。

2. 传统照明控制方式

传统的照明控制包括开关控制和调光控制两个方面，而调光控制又包括连续的调光控制(被控光源的光通量可连续地变化)和不连续的调光控制(被控光源的光通量只能在若干固定的预设值之间变化)。对于白炽灯等热辐射光源，既可以实现开关控制，也可以实现调光控制，只需调节供给光源的供电电压即可调节光通量的输出。而对荧光灯等气体放电光源，实现调光控制比较困难，不能简单地控制供给光源的供电电压，这类光源都有镇流器，220V工频电压经过整流器后再给光源供电，要实现调光控制，必须配备适应具体气

体放电光源的匹配的镇流器。通过控制镇流器的输出电压的频率和电压来调节光源的光通量输出。

自爱迪生发明第一个灯泡开始，传统照明控制方式就已经产生，这种控制方式多以手动控制为主。对于照明开关控制，通常利用设置在灯具配电回路中的开关(配电回路中的保护开关或手动开关等)来控制配电回路的通断，从而实现灯具开关控制；对于调光控制，通常利用设置在灯具配电回路中的手动旋钮(传统调光控制柜和灯光控制台等)调节供电回路的电气参数(主要是电压、电流、频率等)，从而实现灯光的明暗调节，即调光控制。传统照明控制方式原理如图 6.10 所示。

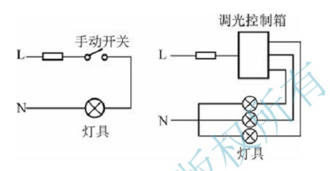


图 6.10 传统照明控制方式原理

目前传统照明开关控制方式主要有跷板开关控制、断路器控制、定时控制、光电感应开关控制等几种控制方式。其中跷板开关控制是应用最广的一种控制方式，可进行单控、双控、多控等不同形式的照明控制，双控及多控开关接线图如图 6.11 所示。跷板开关控制方式线路烦琐、维护量大、线路损耗多，很难实现舒适照明；若有一组灯具需要控制时，通常采用断路器进行控制，该控制方式具有投资小、控制简单等优点，但由于控制的灯具较多，会造成大量灯具同时开关，节能效果差，并且很难满足特定环境下的照明要求，因此一般很少采用；定时控制灵活性较差，在照明控制中应用相对较少；光电感应开关控制通过测定工作面的照度与设定值比较，来控制照明开关，这样可以最大限度地利用自然光，达到节能的目的，同时也可提供一个较不受季节与外部气候影响的相对稳定的视觉环境，特别适合一些采光条件好的场所，当检测的照度低于设定值的极限值时开灯，高于极限值时关灯。

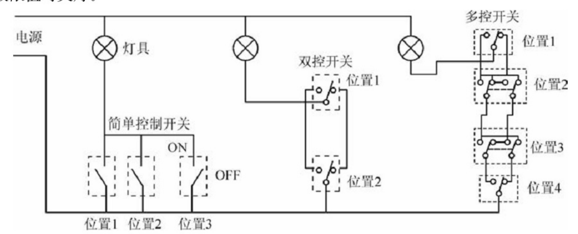


图 6.11 双控及多控开关接线图

3. 照明自动控制方式

传统照明控制方式简单、有效、直观，但它过多依赖手工操作。照明自动控制方式的出现，解决了传统照明控制方式相对分散和无法有效管理等问题，其应用范围越来越广泛。照明系统的自动控制同样包括开/关控制和调光控制两个方面。开/关控制主要负责控制某个回路或某个照明子系统的启/停，这部分控制一般由楼宇自控系统的照明设备监控子系统直接控制完成；调光控制包括多级、无级调节两大类，多级、无级调节主要控制部分区域的照明效果，如泛光照明的艺术效果、会场照明的各种明暗效果等，这类控制一般由专用的控制器或控制系统完成，专用的控制器或控制系统可以独立运行，也可以通过接口接受照明设备监控系统的部分指令。无论是照明设备监控系统直接控制的开/关控制还是通过接口控制的多级、无级调节，楼宇照明设备的自动控制都包括以下几种典型的控制模式。

（1）时间表控制模式。这是楼宇照明控制中最常用的控制模式，工作人员预先在上位机中编制运行时间表，并下载至相应控制器，控制器根据时间表对相应照明设备进行启/停控制。时间表中可以随时插入临时任务，如某单位的加班任务等，临时任务的优先级高于正常时间配置，且一次有效，执行后自动恢复至正常时间配置的安排。

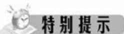
（2）情景切换控制模式。在这种模式中，工作人员预先编写好几种常用场合下的照明方式，并下载至相应控制器。控制器读取现场情景切换按钮状态或远程系统情景设置，并根据读入信号切换至对应的照明模式。

（3）动态控制模式。这种模式往往和一些传感器设备配合使用。如根据照度自动调节的照明系统中需要有照度传感器，控制器根据照度反馈自动控制相应区域照明系统的启/停或照明亮度。又如有些走道可以根据相应的声感、红外感应等传感器判别是否有人经过，借以控制相应照明系统的启/停等。

（4）远程强制控制模式。除了以上介绍的自动控制方式外，工作人员也可以在工作站远程对固定区域的照明系统进行强制控制，远程设置其照明状态。

（5）联动控制模式。联动控制模式是指由某一联动信号触发的相应区域照明系统的控制变化。如火警信号的输入、正常照明系统的故障信号输入等均属于联动信号。当它们的状态发生变化时，将触发相应照明区域的一系列联动动作，如逃生诱导灯的启动、应急照明系统的切换等。

以上各种控制模式之间并不相互排斥，在同一区域的照明控制中往往可以配合使用。当然，这就需要处理好各模式之间的切换或优先级关系。以走廊照明系统为例，可以采用时间表控制、远程强制控制及安保联动控制三种模式相结合的控制方式。其中，远程强制控制的优先级高于时间表控制，安保联动控制的优先级又高于强制远程控制。正常情况下，走道照明按预设时间表进行控制；如有特殊需要可远程强制控制某一区域的走道照明启/停；当某区域安保系统发生报警时，自动打开相应区域走道的全部照明，以便用闭路电视监控系统查看情况。



特别提示

照明控制方式有多种，无论哪种控制方式，其控制内容均主要包括开关控制和调光控制两个方面。传统照明控制方式节能效果较差，而照明自动控制方式不仅提高了管理效率，而且节能效果显著。学习时要注意两者的区别。

6.2.2 照明系统的监控

1. 照明监控系统的需求分析

照明设备的自动控制需根据不同的场合、用途需求进行，以满足用户的需求。一般楼宇中，照明设备监控系统所应用的场合及具体需求包括。

(1) 办公室及酒店客房等区域。此类区域的照明控制方式有就地手动控制、按时间表自动控制、按室内照度自动控制、按有/无人自动控制等几种。部分建筑物中此类区域的照明控制也可通过手机、电话、Internet 等方式进行远程遥控。

(2) 门厅、走道、楼梯等公共区域。在现代化建筑物中，此类区域的照明控制主要采用时间表控制的方式。如在办公楼宇中，走道照明一般在清晨定时全部开启，整个工作时间维持正常工作的需要；到晚上，除特殊区域申请加班外，其他区域仅长明灯保持开启，以维持巡更人员的可视照度；不同回路的照明灯交替作为长明灯使用，保证同一区域灯泡寿命基本相同，延缓灯泡老化，增加其寿命。除此以外也有部分楼宇采用照度自动调节、有/无人自动控制等方式对公共区域照明进行控制的，但应用较少。

(3) 大堂、会议厅、接待厅、娱乐场所等区域。此类区域照明系统的使用时间不定，不同场合对照明需求差异较大，因此往往预先设定几种照明场景，使用时根据具体场合进行切换。以会议厅为例，在会议的不同进程中，对会议室的照明要求各异。会议尚未开始时，一般需要照明系统将整个会场照亮；主席发言时要求灯光集中在主席台，听众席照明相对较弱；会议休息时一般将听众席照明照度提高，而主席台照明照度减弱等。在这类区域的照明控制系统中，预先设定好几种常用场景模式，需要进行场景切换时只需按动相应按钮或在控制计算机上进行相应操作即可。

(4) 泛光照明系统。单个或单组泛光照明灯的照明效果一般由专用控制器进行控制，不受楼宇自控系统的控制，但照明设备监控系统可以通过相应接口(一般为干接点接口)控制整个泛光照明系统的启/停和进行场景模式选择。泛光照明的启/停控制以往一般由时间表或人工远程控制，但现在许多区域都要求实现区域泛光照明的统一控制。如上海黄浦江两岸建筑物的泛光照明就由政府的照明管理办公室统一控制启/停。具体控制方法是通过一个无线控制器，此控制器可以接受照明管理办公室发出的无线信号以控制相关照明控制器中的干接点通/断。照明设备监控系统首先读取此干接点信号的状态，然后根据干接点信号的状态来驱动本建筑物泛光照明设备的启/停。通过这种方式实现泛光照明的区域统一管理。

(5) 事故及应急照明设备。事故及应急照明设备的启动一般由故障或报警信号触发，属于系统间或系统内的联动控制。如火灾报警触发逃生诱导灯的启动，正常照明系统故障

触发相应区域应急照明设备的启动等。

(6) 其他区域照明。除上述讨论的几个典型区域和用途的照明外，建筑物照明系统还包括航空障碍灯、停车场照明等，这些照明系统大多均采用时间表控制方式或按照度自动调节控制方式进行控制。其中航空障碍灯根据当地航空部门的要求设定，一般装设在建筑物顶端。障碍照明属于一级负荷，应接入应急照明回路。

2. 照明系统的监控原理

照明控制系统主要针对公共区域照明、应急照明、泛光照明、航空障碍灯等进行直接监控，这些照明设备的监控内容大都是开关量，包括开/关控制、运行/故障状态监视、手/自动状态监视等。其中，应急照明一般只监不控，其联动控制内容由其他系统完成。作为建筑设备监控系统(BAS)的一个子系统，目前照明系统的自动控制有两种形式，一种是将照明系统和建筑物内空调系统、给排水系统等设备包含在一起采用直接数字控制器(DDC)进行监控，直接数字控制器通过控制供电回路中接触器的分合，从而控制供电回路的通断，实现灯具开关控制，其监控原理如图 6.12 所示。采用 DDC 控制尽管可对照明灯实现定时开关，对各个区域进行调控，但具有一定的局限性。它的控制器模块性能、功能都比较简单，输出功率小、回路少，灯具以开关控制为主，即使有调光，其调光功能和调光技术都很简单，照明灯调光后的场景效果较差，灯光场景等预设置和场景管理等功能也很难实现。而且由于通常以中央监控为主，缺乏现场调控手段，给操作使用带来诸多不便。另外这种控制方式对 DDC 本身要求很高，必须具有足够的处理能力和极高的可靠性，当系统任务量增加时，DDC 的效率和可靠性将急剧下降。

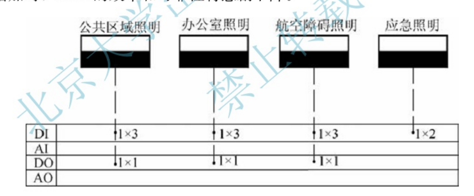


图 6.12 照明系统监控原理图

照明系统自动控制的另外一种形式是采用专业的照明控制系统，即智能照明控制系统。所谓智能照明控制系统，是指利用计算机技术、网络技术、无线通信数据传输、电力载波通信技术、计算机智能化信息处理技术、传感技术及节能型电器控制等技术组成的分布式无线或有线控制系统，通过预设程序的运行，根据某一区域的功能、每天不同的时间、室外光亮度或该区域的用途来自动控制照明。智能照明控制系统不依赖于建筑设备监控系统，可独立运行，也可通过网关接入建筑设备监控系统，接受统一的管理和控制。

智能照明系统是基于计算机控制平台的全数字、模块化、分布式总线型控制系统。系统所有的单元器件均内置微处理器和存储单元，并由信号总线连接成网络，每个单元均可分配唯一的单元地址。当有输入时，输入单元首先将其转变为总线信号，然后在控制系统

总线上广播，所有的输出单元接收信号后进行判断，继而控制相应回路输出。如图 6.13 所示典型的智能照明控制系统结构图。

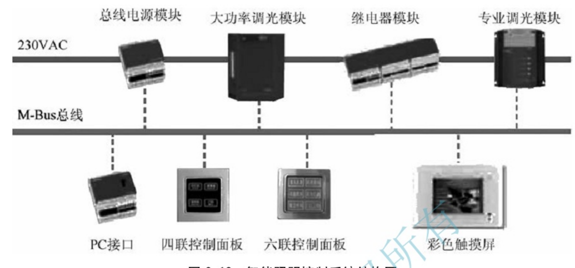


图 6.13 智能照明控制系统结构图

智能照明的系统通常主要由调光模块、开关模块、控制面板、液晶显示触摸屏、智能传感器、PC 接口、时间管理模块、手持式编程器、监控计算机等部件组成。

1）线路系统

（1）单控电路：负载回路连线接到输出单元的输出端，控制开关用五类线与输出单元相连。负载容量较大时仅考虑加大输出单元容量，控制开关不受影响；开关距离较远时，只需加长控制总线的长度，节省大截面电缆用量；可通过软件设置多种功能(开/关、调光、定时等)。

（2）双控电路：实现双控时只需简单地在控制总线上并联一个开关即可；进行多点控制时，依次并联多个开关即可，开关之间仅用一条五类线连接，线路安装简单省事。传统双控回路接线图和智能照明控制系统双控回路接线图分别如图 6.14 和图 6.15 所示。

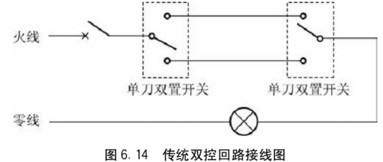


图 6.14 传统双控回路接线图

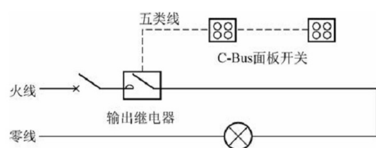


图 6.15 智能照明控制系统双控回路接线图

2）控制方式

智能照明控制采用低压二次小信号控制，控制功能强、方式多、范围广、自动化程度高，通过实现场景的预设置和记忆功能，操作时只需按一下控制面板上某一个键即可启动一个灯光场景(各照明回路不同的亮暗搭配组成一种灯光效果)，各照明回路随即自动变换到相应的状态。上述功能也可以通过其他界面如遥控器等实现。

3）照明方式

智能照明控制系统采用“调光模块”，通过灯光的调光在不同使用场合产生不同灯光效果，营造出不同的舒适的氛围。

4）管理方式

传统控制对照明的管理是人为化的管理；智能控制系统可实现能源管理自动化，通过分布式网络，只需一台计算机就可实现对整幢大楼的管理。

3. 照明控制系统的主要控制内容

1）定时控制

通过时钟管理器、定时器等电气元件，实现对各区域内用于正常工作状态的照明灯具时间上的不同控制。定时控制有两种，一种是相对时间间隔来控制，一种是根据天文时间来控制。

2）开关控制

由控制中心自动或就地控制面板对灯光进行开/关控制。

3）调光控制

由控制中心自动或就地控制面板对灯光进行调光控制。

4）照明亮度自动调节控制

利用照度动态检测器等电气元件，通过开关控制或调光控制，实现对照明灯具的自动控制，使该区域内的照度不会随日照等外界因素的变化而改变，将照度自动调整到最适宜的水平(人工照度＝照度标准－天然照度)。

5）场景控制

通过每个调光模块和控制面板等电气元件，对各区域内正常工作状态的照明区域的场景切换控制。

6）动静探测控制

通过每个调光模块和动静探测器等电气元件，实现对各区域内正常工作状态的照明灯具的自动开关控制。

7）手动遥控器控制

在正常状态下通过红外线遥控器，实现对各区域内照明灯具的手动控制和区域场景控制。

8）自然光源利用控制

调节有控光功能的建筑设备(如百叶窗帘)来调节控制天然光，还可以和灯光系统联动。当天气发生变化时，系统能够自动调节，无论在什么场所或天气如何变化，系统均能保证室内的照度维持在预先设定的水平。

9）应急照明控制

智能照明控制系统对特殊区域内的应急照明实现控制，使得在正常状态时按一般工作照明灯具进行控制，应急状态时自动解除应急照明灯具智能控制，按照应急照明工作模式运行。

4. 智能照明控制的优点

（1）改善工作环境，提高工作效率。传统照明控制系统中，配有传统镇流器的日光灯以100Hz的频率闪动，这种频闪会使工作人员头脑发胀、眼睛疲劳，降低了工作效率。而智能照明系统中的可调光电子镇流器则工作在很高的频率(40～70kHz)，不仅克服了频闪，而且消除了启辉时的亮度不稳定，在为人们提供健康、舒适环境的同时，也提高了工作效率。

（2）保护灯具、延长灯具寿命。智能照明控制系统是一个完善的工作保护体系，能适应电源电压、频率的变化，成功地抑制电网的浪涌电压、电磁干扰等各种电压冲击，改善电源的电压输出波形，使灯具不会因电压过高而过早损坏。同时，系统中的灯具大部分时间工作在低电压调光状态，这种长时间低电压工作状态能大幅度延长灯具寿命，有效地降低了照明系统的运行费用。这对于难安装区域灯具和昂贵灯具更具特殊意义。

（3）节约能源。智能照明控制系统能利用智能传感器适应室外光线的亮度，自动调节灯具的亮度，以保持室内照度的一致性，即室外自然光线强，室内灯光自动调弱；室外自然光线弱，室内灯光自动变强，以充分利用室外的自然光，既创造了最佳的工作环境，又能达到节能的效果。同时，它还能利用时钟管理器根据不同日期、不同时间按照各个功能区的运行状况预先设定的照度设置，来控制各个区域照明灯具的启闭，保证照明系统只有在必需的时候才把灯点亮并控制到要求的亮度，从而实现利用最少的能耗提供最舒适的照明环境。此外，智能照明控制系统在对荧光灯等气体放电光源灯具进行调光控制时，采用了具有有源滤波技术的可调光电子镇流器，降低了谐波的含量，提高了功率因素，从而降低了低压无功损耗。

（4）友好的图形监控软件。智能照明控制系统具有现代控制技术的特点，配置微型计算机和专门的控制管理软件。大楼管理员可在中央控制室通过微机监视、控制各照明子系统上各类器件的工作状态，同时可修改或重新设置各类器件的参数，对整个大楼的照明系统进行图形化的管理操作。此外，系统还可通过微机和建筑设备自动化系统相连接。通过计算机网络联入远程维护中心，可实现对整个系统远程维护。

（5）系统扩展灵活，应用范围广。系统的各功能模块都挂于一个控制总线上，这种系统可大可小，便于扩充。小系统可只由一个调光模块(或一个开关模块)和几个控制面板组成，用于一个会议室、一座别墅或一个家庭的灯光控制。复杂的系统可配置计算机监控中心，这个监控中心可和智能建筑的中央控制室合用，实现就地控制和集中控制的良好结合。

（6）提高管理水平，减少维护费用。智能照明控制系统将普通照明人为的开与关转换成智能化管理，不仅使大楼的管理者能将其高素质的管理意识运用于照明控制系统中去，而且还能大大减少大楼的运行维护费用，并带来极大的投资回报。

特别提示

智能照明系统采用了先进的现场总线技术，有效地提高了系统的可靠性、灵活性、可扩展性以及可维护性。而采用DDC进行照明控制，其系统结构为集散控制系统。在控制系统结构方面，现场总线系统具有一定的优势。

6.2.3 智能照明控制系统工程应用

目前专业的智能照明控制系统品牌较多，常见品牌有：澳洲邦奇的Dynet、ABB的I-Bus、奇胜的C-Bus、Siemens和ABB的EIB、瑞朗、百分百照明、清华同方、海尔等。这些智能照明控制系统的构成基本相同，稍有差异。下面以C-Bus系统为例，介绍智能照明控制系统在建筑照明工程的应用情况。

1. C-Bus系统工作原理

C-Bus即ClipsalBus的简称，是奇胜(Clipsal)公司的总线协议，采用两线制双绞线，即一对线上既提供总线设备工作电源(15～36V DC)，又传输总线设备信息，总线设备之间直接通信，无须通过中央控制器。C-Bus的传输协议为CSMA/CD，通信速率为916KB/s。

C-Bus系统是一个分布式、总线型的智能控制系统，主要用于对照明系统的控制；也可用于消防等系统中的联动控制；除此之外还可以与其他如空调、消防、保安等系统联动。

系统所有的单元器件(除电源外)均内置微处理器和存储单元，由一对信号线(五类线)连接成网络。每个单元均设置唯一的单元地址并用软件设定其功能，通过输出单元控制各回路负载。输入单元通过群组地址和输出组件建立对应联系。当有输入时，输入单元将其转变为C-Bus信号在C-Bus系统总线上广播，所有的输出单元接收并做出判断，控制相应回路输出。系统所有的参数被分散存储在各个单元中，即使系统断电也不会丢失。

C-Bus系统通过控制总线将所有单元器件连接成网络。总线上不仅为每个器件提供36V直流工作电源，还加载了控制信号。C-Bus通过系统编程使控制开关与输出回路建立逻辑对应关系，因此在设计时更加简单、方便、灵活。C-Bus系统既能独立运行，又能通过专用接口和软件协议与BAS相互连接和通信，构成一个完整的建筑设备管理系(BMS)，实现数据交换与共享，实现统一协调地控制与管理。C-Bus系统原理如图6.16所示。

2. 系统主要硬件及功能

1) PC接口

连接C-Bus照明系统与电脑或调制解调器的通信接口，同时又用作系统的时钟发生器。通过PC接口，电脑可以发指令给C-Bus输出单元，可以对C-Bus单元编程修改；可以对C-Bus系统进行监控和数据记录；可以用电脑来诊断故障。

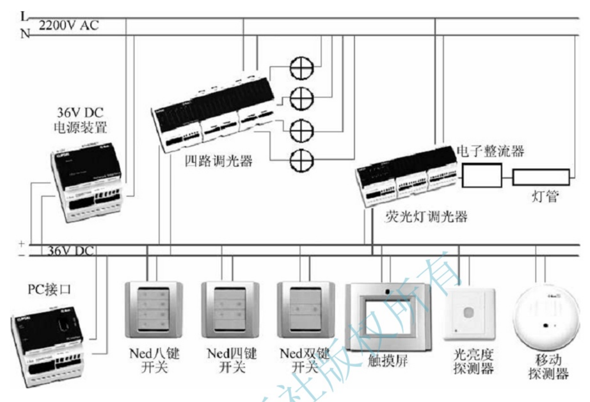


图 6.16 C－Bus 系统原理

2）红外线移动探测器

用于探测人体移动时发出的红外线，去感知环境是否有人在活动，通过总线输入相应信号，从而实现“人来灯亮，人走灯灭”的功能。

3）调光器

用于对灯具进行调光或开关控制，能记忆多个预设置灯光场景，不因停电而被破坏。调光器控制灯具亮度采用软启动方式，即渐增渐减方式，这样的调节方式能防止电压突变对灯具的冲击，同时使人的视觉十分自然地适应亮度的变化，没有突然变化的感觉。另外，调光器输入电源有一个由微处理机控制的 RMS 电压调节技术，确保输出电压稳定，不会对负载回路产生过压。

4）触摸屏

可图文同时显示，可根据用户需要产生模拟各种控制要求和调光区域灯位亮暗的图像，用以在屏幕上实现形象直观的多功能面板控制，既可用于就地控制，也可用作多个控制区域的监控。

3. C－Bus 系统的优越性

1）安装便捷，节省线缆

C－Bus 系统是一种二线制的照明控制系统，以一对 UTP 五类线作为控制总线，将系统中的各个输入、输出和系统支持单元连接起来，大截面的负载线缆从输出单元的输出端直接接到照明灯具或其他用电负载上，而无须经过开关。安装时不必考虑任何控制关系，在整个系统安装完毕后再通过 C－Bus 软件设置各个单元的地址编码，从而建立对应的控制关系。由于 C－Bus 系统仅在输出单元和负载之间使用负载线缆连接，与传

统控制方法相比节省了大量原本要接到开关的线缆，也缩短了安装施工的时间，节省了人工费用。

2）可编程性

C-Bus 系统可以通过电脑，用 C-Bus 控制软件对整个照明系统进行远程控制和中央监控，并可以随时方便地根据用户需求修改控制关系。C-Bus 系统提供的可编程性对今后可能发生的变动有很强的适应性，当某种原因需要变更照明控制关系时，只需在软件中进行修改，而无须重新敷设线缆。

3）节约能源，降低运行维护费用

由于 C-Bus 系统中采用了红外线传感器、亮度传感器、定时开关以及可调光技术，智能化的运行模式，使整个照明系统可以按照经济有效的最佳方案来准确运作，不但能大大降低运行管理费用，而且能最大限度地节约能源，与传统的照明控制方式相比较，可以节约电能约 30%。

4）系统开放性好

C-Bus 系统具有开放性，提供与 BAS(包括闭路监控、消防报警、安全防范系统)相连接的接口和软件协议，便于构成一个完整的建筑设备自动化系统。智能建筑采用 C-Bus 智能化照明管理系统，不仅有助于提升照明品质，还将大大提高整个建筑物的智能化管理水平。

特别提示

C-Bus 系统是一个专门针对照明需要而开发的智能照明系统，可以独立运行。它有一套独立的控制协议，相对 BAS 来说比较简单，能完全满足对照明控制的需求，而且造价相对 BA 控制便宜。采用专业的照明控制系统，既可以降低造价又可以实现更加完美的智能照明控制，同时还可以保护灯具，节约能源，降低运行费用。

6.3 电梯系统控制

电梯是机与电紧密结合的复杂产品，是智能建筑必备的垂直交通工具。随着社会的发展，人们对电梯在可靠性、速度、舒适性等方面的要求越来越高。在智能建筑中，对电梯的启动加速、制动减速、正反向运行、调速精度、调速范围和动态响应等都提出了更高的要求。因此，现代电梯均采用了先进的控制系统。

6.3.1 电梯控制系统认知

1. 电梯的分类

1）按用途分类

（1）乘客电梯。为运送乘客设计的电梯，要求有完善的安全设施以及一定的轿内装饰。

(2) 载货电梯。主要为运送货物而设计，通常有人伴随的电梯。

(3) 医用电梯。为运送病床、担架、医用车而设计的电梯，轿厢具有长而窄的特点。

(4) 杂物电梯。供图书馆、办公楼、饭店运送图书、文件、食品等设计的电梯。

(5) 观光电梯。轿厢壁透明，供乘客观光用的电梯。

(6) 车辆电梯。用作装运车辆的电梯。

(7) 船舶电梯。船舶上使用的电梯。

(8) 建筑施工电梯。建筑施工与维修用的电梯。

(9) 其他类型的电梯。除上述常用的电梯外，还有些特殊用途的电梯，如冷库电梯、防爆电梯、矿井电梯、电站电梯、消防员用电梯等。

2) 按驱动方式分类

(1) 交流电梯。用交流感应电动机作为驱动力的电梯。根据拖动方式又可分为交流单速、交流双速、交流调压调速、交流变压变频调速等。

(2) 直流电梯。用直流电动机作为驱动力的电梯。这类电梯的额定速度一般在2.00m/s以上。

(3) 液压电梯。一般利用电动泵驱动液体流动，由柱塞使轿厢升降的电梯。

(4) 齿轮齿条电梯。将导轨加工成齿条，轿厢装上与齿条啮合的齿轮，电动机带动齿轮旋转使轿厢升降的电梯。

(5) 螺杆式电梯。将直顶式电梯的柱塞加工成矩形螺纹，再将带有推力轴承的大螺母安装于油缸顶，然后通过电机经减速机(或皮带)带动螺母旋转，从而使螺杆顶升轿厢上升或下降的电梯。

(6) 直线电机驱动的电梯。其动力源是直线电机。

3) 按速度分类

(1) 低速梯。常指低于1.00m/s速度的电梯。

(2) 中速梯。常指速度在1.00～2.00m/s的电梯。

(3) 高速梯。常指速度大于2.00m/s的电梯。

(4) 超高速。速度超过5.00m/s的电梯。

4) 按电梯有无司机分类

(1) 有司机电梯。电梯的运行方式由专职司机操纵来完成。

(2) 无司机电梯。乘客进入电梯轿厢，按下操纵盘上所需要去的层楼按钮，电梯自动运行到达目的楼层，这类电梯一般具有集选功能。

(3) 有/无司机电梯。这类电梯可变换控制电路，平时由乘客操纵，如遇客流量大或必要时改由司机操纵。

5) 按操纵控制方式分类

(1) 手柄开关操纵。电梯司机在轿厢内控制操纵盘手柄开关，实现电梯的启动、上升、下降、平层、停止的运行状态。

(2) 按钮控制电梯。是一种简单的自动控制电梯，具有自动平层功能，常见的有轿外按钮控制、轿内按钮控制两种控制方式。

(3) 信号控制电梯。这是一种自动控制程度较高的有司机电梯。除具有自动平层、自

动开门功能外，尚具有轿厢命令登记，层站召唤登记，自动停层，顺向截停和自动换向等功能。

(4) 集选控制电梯。是一种在信号控制基础上发展起来的全自动控制的电梯，与信号控制的主要区别在于能实现无司机操纵。

(5) 并联控制电梯。2～3 台电梯的控制线路并联起来进行逻辑控制，共用层站外召唤按钮，电梯本身都具有集选功能。

(6) 群控电梯。是用微机控制和统一调度多台集中并列的电梯。群控有梯群程序控制、梯群智能控制等形式。

6) 特殊电梯

(1) 斜行电梯。轿厢在倾斜的井道中沿着倾斜的导轨运行，是集观光和运输于一体的输送设备。特别是由于土地紧张而将住宅移至山区后，斜行电梯发展迅速。

(2) 立体停车场用电梯。根据不同的停车场可选配不同类型的电梯。

(3) 建筑施工电梯。是一种采用齿轮齿条啮合方式(包括销齿传动与链传动，或采用钢丝绳提升)，使吊笼作垂直或倾斜运动的机械，用以输送人员或物料，主要应用于建筑施工与维修。它还可以作为仓库、码头、船坞、高塔、高烟囱的长期使用的垂直运输机械。

2. 电梯的控制功能

在建筑物应用的各种机电设备中，电梯的控制是最为复杂的。电梯的控制主要是对各种指令信号、位置信号、速度信号和安全信号进行管理，使电梯正常运行或处于保护状态，发出各种显示信号。电梯的控制功能主要包括以下几方面。

(1) 呼梯功能。响应使用人员在厅门的呼唤信号，依据轿厢运行状态及控制设计，前往该层执行运送任务。

(2) 轿内指令功能。响应、登记并执行轿内人员的任何操作。除专业人员操作的开关、按钮必须封闭外，轿厢操纵盘面上按钮的任何操作，均不得产生任何误动，更不容许有故障发送。

(3) 选层、定向功能。当接收到若干个内选外召指令时，电梯可根据轿厢实际运行状态，选择最佳运行路线停靠。

(4) 减速、平层功能。轿厢在到达停靠站前某一位置或时刻，自动减速缓行，进入平层区后，进行平层校正；当与层站平面一致时，自动停车。

(5) 指示功能。可在各层厅门前、轿厢内显示轿厢当前位置、内选外召登记记录及响应消号情况，以及故障的报警等。

(6) 保护功能。电梯运行出现异常，如过载、越线、门失灵、断绳、失速等现象时电梯的自动保护。

3. 电梯的自动控制原理

电梯控制主要有继电器控制、微机控制和可编程控制器(PLC)控制三种方式。继电器控制由于具有接线复杂、故障率高、设备庞大等特点，已被淘汰。随着计算机技术、通信技术、大规模集成电路技术的发展，以微机和 PLC 为主的电梯控制技术成为电梯发展和应用的主流。特别是在智能建筑中，电梯作为建筑设备自动化系统中主要受控设备之一，

多种受控信号通过网络传输，送至中央监控计算机，实现对电梯系统的状态监测和数据信息交换。

1）微机控制

采用微机作为信号控制单元，完成电梯的信号采集、运行状态和功能的设定，实现电梯的自动调度和集选运行功能，拖动控制则由变频器来完成。

微机控制电梯系统具有较大的灵活性，对于运动功能的改变，只需要改变软件，而不必增减继电器。系统中位置信号和减速点信号可由微机选层器产生，轿厢内指令、厅门召唤等信号经过接口板送到微机，由微机完成复杂的控制任务，如群控电梯系统中的等候时间分析、自学习功能、节能运行等。

2）PLC 控制

PLC 是微机技术与继电器常规控制技术相结合的产物，是在顺序控制器和微机控制器的基础上发展起来的新型控制器，是一种以微处理器为核心用作数字控制的专用计算机。由于 PLC 具有可靠性高、抗干扰能力强、操作方便、维护简单等特点，因此采用 PLC 控制大大提高了电梯系统的可靠性。此外，与微机控制相比，PLC 更具有灵活性。其配备的编程器可在现场对程序随时修改，方便地修改任一输入/输出接口的功能或逻辑状态。PLC 采用梯形图编程，比继电器电气原理图更清晰直观，同时还具有故障诊断、状态指示、运行监控等功能，方便技术人员掌握。因此，电梯系统大多采用 PLC 控制。

采用 PLC 组成的电梯控制系统，其系统结构简单、紧凑、可靠性高，PLC 电梯控制系统结构图如图 6.17 所示。电梯的内外呼梯信号、层位检测信号、限位信号、开门关门信号等开关量接到 PLC 的开关量输入端，PLC 提供的 24V 直流电源可作为指示灯的电源，PLC 的输出点直接控制变频器，实现电动机的正转、反转、停止和多段速控制等，控制系统硬件框图如图 6.18 所示。

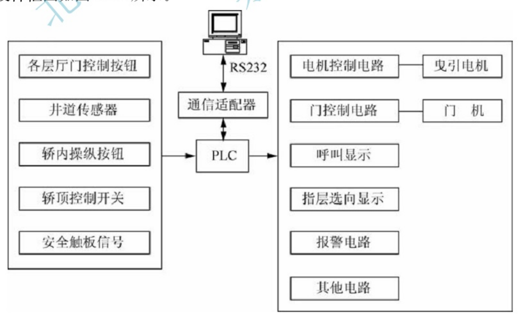


图 6.17 PLC 电梯控制系统结构图

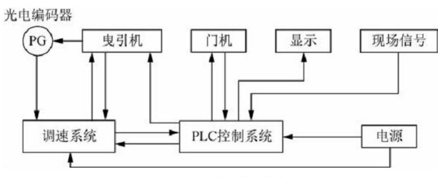


图 6.18 控制系统硬件框图

特别提示

微机控制即单片机控制，单片机所有的控制功能都集中于一个小芯片，I/O 点数有限，可靠性、抗干扰能力、安全性等方面均比 PLC 差。因此单片机虽然具有价格优势，但考虑到电梯系统运行的稳定性，PLC 控制仍是电梯系统的最佳选择。

6.3.2 电梯系统监控

1. 电梯监控系统的构成

电梯监控系统是以计算机为核心的智能化监控系统，如图 6.19 所示。电梯监控系统由主控计算机、显示装置、打印机、远程操作台、通信网络、现场控制器 DDC 等部分组成。主控计算机负责各种数据的采集和处理，显示器用于显示监视的各种状态、数据等画面，以及作为实现操作控制的人机界面。管理人员可通过监控系统对电梯的运行状态进行干预，以便根据需要随时启动或停止任何一台电梯。当发生火灾等紧急情况时，消防监控系统及时向电梯监控系统发出报警和控制信息，电梯监控系统主机再向相应的电梯现场控制器装置发出相应的控制信号，使它们进入预定的工作状态。

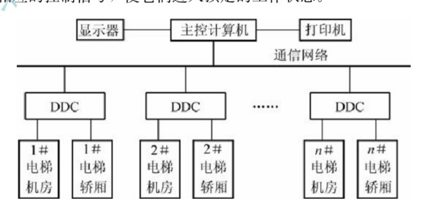


图 6.19 电梯监控系统结构图

电梯监控平台的人机界面画面显示内容如下。

1） 轿厢外的运行状况

通过显示画面可以看到电梯的运动过程和开关门动作，并在每一层都设置三个图形标志，分别表示本层内选、上行外呼和下行外呼。它们的显示和更新与实际电梯的内选、外

呼同步。管理人员可以像站在真实的电梯轿厢外一样，如果要上行，就按上行按钮，如果要下行，就按下行按钮，轿厢就会按要求运动并在相应的楼层停靠。

2）轿厢内的运行状况

以箭头形式表示动态显示电梯运行方向，电梯所到达的楼层(数字)，其显示与实际轿厢中的显示同步，完全相同。并显示轻载、满载、超载、司机、检修、消防、急停、门锁等几个指示等，实时显示电梯所处的状态，以及实时显示电梯运行的速度、运行次数。

管理人员可以方便地在屏幕上通过以上画面观察到整个电梯的运行状态和几乎全部动、静态信息。

2. 电梯监控系统的基本内容

1）对电梯运行状态的监测

按时间程序设定的运行时间表启/停电梯，监视电梯运行状态，对电梯故障及紧急状况报警。运行状态监测包括启动/停止状态、运行方向、所处楼层位置等，通过自动检测并将结果送入 DDC，动态地显示出各台电梯的实时状态。

故障检测包括电动机、电磁制动器等各种装置出现故障后，自动报警，并显示故障电梯的地点、发生故障时间、故障状态等。

紧急状况检测常包括火灾、地震状况检测、发生故障时是否关人等，一经发现，立即报警。电梯运行状态监控原理图如图 6.20 所示。

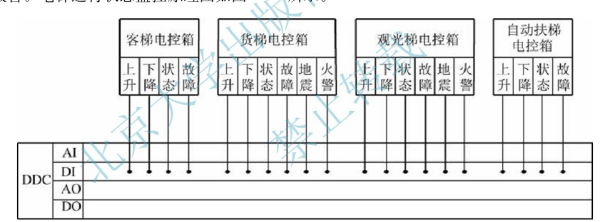


图 6.20 电梯运行状态监控原理图

2）多台电梯的群控管理

以办公大楼中的电梯为例，在上、下班，午餐时间客流十分集中，其他时间又比较空闲。如何在不同客流时期，自动进行调度控制，达到既能减少候梯时间、最大限度地利用现有交通能力，又能避免数台电梯同时响应同一召唤造成空载运行、浪费电力，这就需要不断地对各厅站的召唤信号和轿厢内选层信号进行循环扫描，根据轿厢所在位置、上下方向、停站数、轿内人数等因素来实时分析客流变化情况，自动选择最适合于客流情况的输送方式。群控系统能对运行区域进行自动分配，自动调配电梯至运行区域的各个不同服务区段。服务区域可以随时变化，它的位置与范围均由各台电梯通报的实际工作情况确定，并随时监视，以便随时满足大楼各处不同厅站的召唤。

在客流量很小的“空闲状态”，空闲轿厢中有一台在基站待命，其他所有轿厢被分散

到整个运行行程上。为使各层站的候车时间最短，将从所有分布在整体服务区中的最近一站调度发车，不需要运行的轿厢自动关闭，避免空载运行。

上班时，几乎没有下行乘客，客流基本上都上行，可转入“上行客流方式”，各区电梯都全力输送上行乘客，乘客走出轿厢后，立即反向运行。

下班时，则可转入“下行客流方式”。

午餐时，上、下行客流量都相当大，可转入“午餐服务方式”，不断地监视各区域的客流，随时向客流量大的区域分派轿厢以缓解载客高峰。

通过群控管理，可大大缩短候梯时间，改善电梯交通的服务质量，最大限度地发挥电梯作用，使之具有理想的适应性和交通应变能力。如图 6.21 所示电梯群控管理示意图，所有的探测器通过 DDC 总线连到控制网络，计算机根据各楼层的用户召唤情况、电梯载荷，以及根据井道探测器所提供的各机位置信息，进行运算后，响应用户的呼唤；在出现故障时，根据红外探测器探测到是否有人，进行响应的处理。

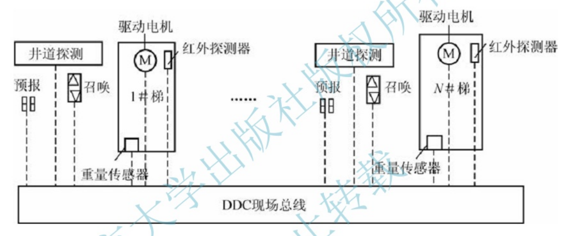


图 6.21 电梯群控管理示意图

3）与消防系统实现协同工作

发生火灾时，普通电梯直驶首层、放客，切断电梯电源；消防电梯由应急电源供电，在首层待命。

4）与安全防范系统实现协同工作

接到安防系统的信号时，根据保安级别自动行驶至规定楼层，并对轿厢门实行监控。

特别提示

目前在我国由于电梯在设计制造时，其控制系统自成体系、相对独立。与建筑设备自动化系统在通信协议、接口等方面尚无统一的标准规范，因此大多数电梯控制系统是一个封闭的系统，建筑设备自动化系统只能对其运行状态进行监测，而无法进行直接控制。

本章小结

本章以供配电系统、照明系统和电梯系统的监控原理为中心内容。首先介绍了供配

电、照明系统的基本知识和监控原理，列举了在智能建筑实际工程中的应用案例，这将有助于读者加深对供配电与照明监控系统的进一步理解和掌握。电梯系统的监控也是电气设备系统监控的一部分，电梯系统的监控与供配电、照明系统的监控一样，都是通过现场控制器进行控制，只是监控的内容不同。读者要注意的是，由于供配电、照明和电梯本身往往都配有成套的自动监控系统，所以建筑设备自动化系统对这三个系统的监控策略往往是“只监不控”的。

习　　题

一、填空题

1. 电网一般分为__________和__________两大部分。

2. 在智能楼宇用电设备中，火灾自动报警等消防用电设备属于__________级负荷。

3. 为提高智能建筑的供电可靠性，一般采用一路主供、一路备用的方式进行供电，主供电源与备用电源通过__________实现自动切换。

4. 智能建筑供配电系统的供电电压一般为__________ kV。

5. 一般采用放射式专线供电的智能楼宇设备有__________、__________和__________等。

6. 一般设置在高压配电室内，为高压主开关操作、保护、自动装置及事故照明等提供直流电源的是__________。

7. 照明控制主要有__________和__________两大类。其中__________主要控制照明回路或照明子系统的启/停，__________主要控制照明效果。

8. 照明系统中如果需要根据照度自动调节照明亮度，应采用__________控制模式。

9. 应急照明包括：__________、__________和__________。

10. 应急照明系统的切换通过__________控制模式实现。

11. C-Bus 照明系统通过__________与电脑相连。

12. 为避免数台电梯同时响应同一召唤造成空载运行、浪费电力，应考虑采用__________技术。

13. 电梯轿厢内外的运行状况可通过__________显示出来。

二、简答题

1. 供配电监控系统的控制功能有哪些？

2. 简述楼宇供配电系统的组成。

3. 叙述高压线路的电压及电流检测方法。

4. 建筑供配电监测的内容有哪些？

5. 某工程设计中，对供配电系统的高低压侧均进行了频率监视，试分析其是否必要？为什么？

6. 某楼宇自控系统工程采用应急柴油发电机组作为备用电源，在供配电监控子系统设计中，是否需要考虑对应急柴油发电机组进行控制？

7. 对变压器进行监测的主要目的是什么？

8. 简述照明系统的控制方式。

9. C－Bus 智能照明系统的优点有哪些？简述 C－Bus 系统的结构。

10. 照明监控系统的监控内容有哪些？

11. 结合一个工程实例，简述电气照明监控系统的监控功能。

12. 某工程设计中，对照明系统采用时间表控制、远程强制控制及联动控制三种模式相结合进行控制，这三种模式如何进行切换？

13. 简述电梯监控系统的功能及监控的内容。

14. 试总结电梯群控技术的作用。

15. 电梯监控系统与安全防范系统、消防系统如何实现联动？

三、绘图题

1. 某工程供配电设备包括变压器 1 台，高压开关柜 2 台，低压开关柜 3 台，柴油发电机 1 台，该供配电系统希望通过 BAS 实现设备群控，试绘制系统监控原理图。

2. 某照明系统包括公共区域照明、办公照明、应急照明以及停车场照明，该照明系统通过 BAS 实现控制，试绘制此照明系统的监控原理图。



第7章

BAS系统集成

教学目标

通过本章学习使学生了解系统集成的概念、功能、智能楼宇监控中心的职能，掌握建筑设备自动化系统集成的设计原则、步骤与方法，熟悉建筑智能化子系统的集成模式以及系统集成下的通信标准，了解BA工程中系统集成的常见问题。

教学步骤

能力目标	知识要点	权重	自测分数
智能建筑的系统集成	系统集成的概念	10%	
	系统集成的功能	10%	
建筑设备自动化系统集成设计	BAS系统集成方法	20%	
	系统集成设计原则	15%	
	系统集成的步骤	20%	
建筑智能化子系统的集成模式	建筑智能化子系统的集成模式种类	15%	
系统集成下的通信标准	系统集成下的通信标准种类	10%	

▶▶章节导读

智能建筑系统集成是以搭建建筑主体内的建筑智能化管理系统为目的，利用综合布线技术、楼宇自控技术、通信技术、网络互联技术、多媒体应用技术、安全防范技术等将相关设备、软件进行集成设计、安装调试、界面定制开发和应用支持。读者首先会问，智能建筑系统集成有什么优势？有系统集成建筑与无系统集成建筑的区别有多少？7.1 节正好可以让读者知道智能建筑系统集成的基础知识。

读者会接着问，智能建筑系统集成将如何设计？其实，智能建筑系统集成的方法有很多，不同种类的系统集成其构成方式也不同，因此有必要了解智能建筑系统集成的设计原则与步骤。这可以从 7.2 节中获得。

接下来，读者就想知道建筑智能化子系统的集成模式以及系统集成下的通信标准，7.3 节和 7.4 节就给读者介绍了智能建筑智能化子系统的集成模式，以及系统集成下的多种通信标准。

通过本章对智能建筑系统集成的具体介绍，读者将可以从整体上认知智能建筑系统集成的重要性，以及系统集成设计的关键要素。



引例

上海震旦大厦位于上海浦东区滨江大道，楼高 37 层，建筑面积 $10.5\times10^4 m^2$，它以浦东速度建设与发展，建成 5A 级智能建筑大厦，于 2003 年 6 月交付使用。震旦大厦的智能化系统共有 1.2 万多个监控点，23 个自动控制子系统。

震旦大厦的 BMS 系统集成采用了基于 LonWorks 技术平台开发的系列产品，从而实现了多子系统、多控制点的无缝集成和完美结合，体现了 LonWorks 技术在智能建筑中的开放性及互操作性的优势，以及对于大系统的集成适应能力。

为震旦大厦设计的智能化集成管理系统是以 INVENSYS 公司最先进的开放式、标准化的 I/A-BMS 系统为核心，综合了震旦大厦内的 OA、CA 等各个子系统的信息，对它们进行统一的监测和管理，实现必要的联动控制，真正实现了整个大厦信息和资源的共享，从而达到最佳的管理水平，为更上层的网络系统集成提供便利，为震旦大厦的使用者提供全面、高质量、安全、舒适和快捷的综合服务。

震旦大厦采用基于 LonWorks 技术 BMS 系统集成的目的是什么呢？

(1) 对各机电子系统进行统一的监视、控制和管理。

(2) 实现跨子系统的联动，提高大厦的功能水平。

(3) 提供开放的数据结构，共享信息资源。

(4) 提高工作效率，降低运行成本。

基于 BMS 系统集成的震旦大厦可以节约人员 20%～30%，节省维护费 10%～30%，提高工作效率 20%～30%，节约培训费用 20%～30%。



案例小结

智能建筑的系统集成采用基于 LonWorks 的 BMS，可以对大厦内所有实时监控系统

进行集成监控、联动和管理。为建筑物提供智能化管理，使用户感到舒适、方便和安全。尽管增加了初始投资，但后续经济效益显著，这也体现了智能建筑的价值。

7.1 智能建筑的系统集成

7.1.1 建筑设备自动化系统集成的概念

所谓系统集成(Systems Integration，SI)，是指从一定的应用需求出发，将与之相关的各个分立的硬件、软件等各类构件进行改进和改造，使之组合成为一个统一、实用、高效、可靠、低耗的整体，是系统工程概念上的集成。而智能建筑的系统集成则是指将智能建筑内不同功能的智能化子系统在物理上、逻辑上和功能上连接在一起，以实现信息综合、资源共享。一般地，系统集成是通过综合布线系统及计算机网络技术，把构成智能建筑的各个子系统中的设备、功能和信息等集成到一个相互关联的、统一的、协调的系统中，使资源达到充分共享，管理实现高效便利。

狭义上讲，系统集成就是平台的集成，系统平台的关键技术就是计算机网络技术。如将 OA 与 BA 系统进行集成时，需要支持网络间互联的设备、接口、协议、Client/Server计算机或联机事物处理的支撑软件和一组标准的应用程序接口；而广义上系统集成的概念可以从单体智能建筑扩展至智能建筑群、智慧城市的系统集成，最终集成为一个全球贯通的大系统——数字地球。

智能化楼宇集成化的技术是建立在系统集成、功能集成、网络集成和软件界面集成等多种集成技术基础上的一门新型技术。智能楼宇的智能化实质就是集成化，就是信息资源和任务的综合共享与全局一体化的综合管理。通过对智能建筑各子系统进行系统集成，可以对各个子系统进行集中监控，从而提高管理和服务效率，节省成本，降低运行和维护费用；可以优化总体设计，减少各个子系统中的硬件和软件重复投资；可以使操作和管理人员能更加容易地掌握其操作和维护技术；可以为业主或租赁户提供高效率、高质量的物业管理服务，提升建筑物的档次，使建筑物售前升值、售后保值；还可以为业主或租赁户提供一条建筑物内外四通八达的信息高速公路。

特别提示

智能大厦系统集成概念经常被错误理解，“集成”设计较弱一些的大厦仅仅有综合布线系统的建设，就称其为智能大厦，设计者没有理解系统集成的真正内涵。另外设计者对智能建筑设计的重点大多集中在智能化系统上，而在建筑平台方面注意不够。从而使建筑结构的灵活性、适应性欠佳，对智能化系统设备的安装空间、管线等考虑不周。

7.1.2 智能化系统集成的功能

单一的各个子系统是独立的，无法共享各个系统之间的信息和实现跨系统的功能联动，也就不能做到对整个智能化系统进行统一的监视和管理。系统集成是将智能化子系统

通过接口连接建筑物主干局域网，实现信息共享和对外界的通信。因此，智能化集成系统具有信息共享、管理各个子系统等功能。

1. 信息汇集

集成系统将分散的、相互独立的智能化子系统用相同的环境、相同的软件界面进行集中监视。各个部门以及管理员可以通过自己的计算机或终端进行监视和控制，比如可以通过计算机查看环境温度、湿度等实时参数和历史参数，空调、电梯等设备的运行状态，建筑物的用电、用水、通风和照明情况，以及保安、巡查的布防情况，消防的烟感、温感状态等。

2. 管理子系统

单独的子系统在集成以后可以建立跨系统的联动功能，即可以实现信息点与受控点在不同子系统中的联动。例如：当建筑物发生火灾报警时，建筑物的自动控制系统关闭空调电源，门禁系统打开房门的电磁锁，相关人员监视的闭路显示系统将画面切换到火灾报警地点，同时停车场管理系统打开车门栅栏。这些事件的综合处理大大提高了建筑物的自动化水平，是在各自独立的子系统中不能实现的。

3. 共享信息资源

随着计算机和网络技术的发展，信息环境的建立已经成为了必需。目前限制信息系统发展的主要因素是不同数据类型之间的信息交换，即系统之间的通信接口和通信协议。智能系统控制着建筑物内的机电设备，如空调系统、通信系统、广播系统、安保系统等，传统上各系统自成体系工作，并不和其他系统交换信息。由于数据结构、通信格式的不同，集成系统无法采集所需的信息，信息服务系统、物业管理系统、设备维护系统等将不能发挥正常的作用。计算机集成系统的网络系统将解决这些数据、信息的交换问题。集成系统建立一个开放的工作平台，采集、转译各个子系统的数据，建立对应系统的服务程序，接受网络上所有授权用户的服务请求，即实现数据共享。

4. 系统集成的具体功能

系统集成的功能就具体而言可概括为：

（1）对建筑物内的机电设备进行统一的监视、控制和管理。

（2）对全局资源进行综合调度，实现流程自动化。

（3）实现真正的信息共享，可向其他系统提供信息数据，如将安防数据提交给警方信息中心等。

管理人员在系统的任何终端利用个人的使用权限进行下列操作：

（1）浏览或修改权限给定的信息、数据、文件等内容。

（2）使用系统所涉及的各个子系统所具备的功能。

（3）检测、记录和控制、调节系统内受控设备的工作情况；发生异常现象后自动报警。

（4）在权限范围内重新构建、组织工作界面，即可生成管理人员的个性化人机交互界面。

（5）所有数据、信息和记录都可在子系统中自由的调用，包括通过通信系统从外界获取的内容以及系统自动采样、运算、统计生成的各种数据。

（6）根据国家标准制订和生成建筑物内设备的日常维护和检修计划。

（7）对历史记录的分析，存储大量历年的数据库，可以对各个系统的工况进行预测、预调，辅助管理人员精确制订各种计划预算、生成和预测必要的财政收支报表。

知识链接

系统集成商的未来发展趋势

从行业的现状和趋势分析，集成商将会更多地向总包服务管理的方向发展，这是目前项目招标的一个主要趋势。总包管理可以从两个方面去看。从设计的角度看，现代智能建筑工程是复杂工程，涉及技术广泛、全面，如果没有统一的设计和综合集成，就难以保证智能系统的完整功能，也难以实现设备功能的升级和扩展以及一体化管理与服务给用户带来的方便。

从项目管理的角度看，设立总承包商，可以较好地解决工程实施过程中的各方协调问题，让用户较少费心而达到更好的工程管理；反之，各工程承担方各自工作，互不考虑，会严重影响工程的整体性。

结合行业具体情况来看，实施综合性、复杂的、高难度的大型建筑项目，设立建筑智能化系统总承包方对于保障项目的成功实施是十分必要的。这样，总承包系统集成商本身在技术上会更专业、更全面，与设备厂商的关系更加简单，对设备厂商的依赖也会逐步降低。

7.1.3 智能楼宇监控中心的职能

在一个监控中心(也称中央监控室)内实施对大厦内的消防、安防、各类机电设备、照明、电梯等进行监视与控制，切实做到三位一体、集中管理。一方面可以提高管理和服务效率，以及节省人工成本；另一方面由于采用一个操作系统的计算机平台和统一的监控等管理的界面环境，实施全局事件和事务的处理，使物业管理更趋现代化，同时可以进一步降低大厦的运行和维护费用。这个集建筑设备自动化(BA)、保安监控自动化(SA)和消防自动化(FA)于一体的集成监控系统称之为中央控制室。可以看出，中央控制室是楼宇设备控制的核心，楼宇内各种各样的机械和电子设备，如空调、电梯、给水排水、防火防盗等设备，都要求具有自动控制，使之处于最佳状态下运行，以提高工作效率和质量，确保有一个舒适、清洁、安全的生活与工作环境。

1. 监控中心的用途

监控中心安装有多种设备，主要作为建筑物自动化系统的中心，故应按照系统的要求设有中央站控制设备。监控中心安装中央站打印机、显示控制台，且应有必要的检查与维修的空间。

设备监控室可以与消防控制室及保安监控室安排在相邻或同一个控制室内。因为建筑设备自动化系统是一个综合性系统，该系统可以做到设备监控、消防、安防综合在同一个监控系统内管理，从而起到防灾指挥中心的作用。这样可以做到全面监控，相互协调，充分发挥各系统的协调功能，及时、快速地响应处理各类突发事件，提高防灾的能力和智能化物业管理的效率。同时也可以节省管理人员，以及克服以往那种各子系统采用分散的房间，占用大量宝贵地面空间的缺点。

中央监控管理室的功能通常用以下四个方面来概括。

（1）作为防火管理中心的作用。

（2）作为安防管理中心的作用。

（3）作为设备管理中心的作用。

（4）作为信息情报咨询中心的作用。

2. 监控中心的位置

通常监控中心要求环境安宁，宜设在主楼低层接近负荷中心的地方，也可以设在地下一层。监控中心要求无有害气体、蒸汽及烟尘；远离变电所、电梯、水泵房等电磁波干扰场所；远离易燃、易爆场所。要求无虫害和鼠害，上方无厨房、洗衣房、厕所等潮湿场所。

监控中心的设置，应符合消防的一般规定，即：监控室的门应向疏散方向开启，并应在入口处设置明显标志。

监控中心内应有本建筑物内重要区域和部位的消防、保安、疏散通道，及相关设备的所在位置的平面图或模拟图。

3. 监控中心的设备布置

为了满足综合功能要求和智能化管理的需要，最好建立和设置综合性的中央监控室。大型的监控中心一般设有空调、给排水、供配电、照明、电梯、消防、安防、公共广播等监视控制计算机及各种控制操作盘，还有闭路电视监视器、打印机等设备。

监控中心的布置通常是由两部分组成。一部分是中央监控与管理工作台，工作台长度为 5～7m，主要放置系统网络监控计算机及操作控制盘面；另一部分是闭路监视器和模拟显示屏(如供配电系统模拟显示屏)。工作台与监视屏之间的空间应在 1.5m 以上。一些智能化功能较强的监控中心，不需要模拟显示屏，所有的监控功能均在监控计算机上完成。

4. 监控中心的环境要求

对监控中心环境方面的考虑有以下几方面。

（1）空调。可用自备专用空调或中央空调。

（2）照明。平均最低照度 150～200Lx。一般天棚采用暗装照明，最好是反光照明。

（3）消防。用二氧化碳固定式或手提式灭火装置，禁止用水灭火装置；还要有火灾报警设备。

（4）地面和墙壁。中央监控室的装饰应进行专门的设计，并符合消防规定；中央控制室宜用架空、防静电活动地板，架空高度不低于 0.2m，以便敷设线路；如果线路不是很多，也可以不用架空活动地板，改用扁平电缆等；地面和墙壁要有一定的耐火极限。

7.2 建筑设备自动化系统集成设计

7.2.1 BAS 系统集成方式概述

1. 系统集成的多种解决方案

对建筑物内趋于功能越来越复杂的众多智能化子系统，智能建筑管理人员面临两大难

题：各子系统运行的信息量大、各子系统信息交互作用多。为了解决这些问题，各国系统集成人员提出了不同的解决方案。

北美国家提出了以BA系统为核心的建筑物管理系统(Building Management System，BMS)。

日本提出了以BA系统为核心的建筑物自动化与管理系统(Building Automation Management System，BAMS)。近年又出现专用的设备管理系统(Facility Management System，FMS)概念。

在新加坡等地则在管理系统增设信息管理为任务的网站，对建筑物中所有的弱电系统进行综合信息管理，推行智能建筑管理系统IBMS(Intelligent Building Management System)和I^2BMS(Integrated Intelligent Building Management System)。

国内智能建筑的概念主要由国外引进，因此在系统集成上技术概念都能在上述的方向中加以发展。这些发展流派都有其各自的优点、缺点和使用场合。

2. 系统集成的实现方式

1) 以太网将成为系统集成的基础

智能建筑系统集成的实现，离不开计算机网络和集成技术的发展，在Internet风靡全球的今天，TCP/IP协议已成为事实上的国际标准，而千兆以太网的成功应用，使以太网构成了智能建筑系统集成的基础。

由于计算机网络的普及和发展，人们对于网络带宽提出了更高的要求，诸如视频点播、多媒体通信、电子商务、远程教育、远程医疗、会议电视等。随着LAN技术和千兆以太网的成功应用，势必使以太网成为智能建筑的网络主干，而TCP/IP协议解决了网络互联和异构计算机之间的通信协议，变成了事实上的国际标准。

2) 系统集成的技术手段

目前网络互联的硬件设备已趋向标准化，因此考虑系统集成时主要是解决软件集成和统一通信协议问题，随着智能建筑功能需求的不断提升，建筑设备的监控范围和种类也不断扩大，它们可能采用不同的网络平台、不同的通信协议，在实现BMS系统集成时，为解决互联和互操作问题，就要考虑采用有效、先进的集成方式。

系统集成的技术手段主要有以下几种。

(1) 采用协议转换方式实现系统集成。

(2) 采用开放式标准协议实现系统集成。

(3) 采用ODBC技术实现系统集成。

3) 采用OPC技术实现系统集成

微软公司提供的OLE对象链接和嵌入是用于应用程序之间数据交换及通信的协议，它允许应用程序链接到其他软件对象中，这种用于过程控制的OLE通信标准，即OPC。OPC重点解决应用软件与过程控制设备之间的数据读取和写入的标准化及数据传输功能。

OPC使设备的软件标准化，从而实现不同网络平台、不同通信协议、不同厂家产品方便地互联和互操作。OPC技术的完善和推广，为智能建筑系统集成时，在实时控制域和信息管理域的全面集成创造了良好的软件环境，并且目前采用OPC技术进行系统集成，比采用ODBC技术更为广泛。

3. 基于 BACnet 和 LonWorks 的 BMS

建筑设备管理系统(BMS)对大厦内所有实时监控系统进行集成监控、联动和管理。这些实时监控子系统包括建筑设备自动化系统(BAS)、安防自动化系统(SAS)、火灾自动报警系统(FAS)。BMS 的特点主要体现在综合监控信号处理和快速的响应能力，以及监控参数的统计、汇总、整理等管理的能力上。

BMS 一般采用两层网络结构，上层为主要用于集中监视、信息管理的管理层网络；下层为主要用于现场设备监控的控制层网络。BMS 网络连接所有的设备监控子系统和监控信息点。

1) 管理层网络

管理层网络通常采用以太(Ethernet)局域网，把所有 BMS 监管工作站、数据库服务器、设备监控子系统接口设备等连接在这一层网络上，并把所采集的监控信息及时地反映到 BMS 上来，而 BMS 也可通过这一层网络传输程序、指令等信息到有关的子系统和相关现场监控设备。

管理层网络可连接多个管理子系统。用户不但在监控中心可监视和管理整个 BMS，也可在网络的范围内设立多个监控中心，分部门更方便地管理 BMS 的各子系统。连接多个管理分中心，可作为 BMS 的热备份，如其中任何一个主机出现故障，其他分中心设备可作为备份立刻取代之。

2) 控制层网络

控制层网络主要是在控制网与信息网之间的协议转化器与各现场监控设备之间建立网络连接，实现监控信息的采集、转换、传输和控制。

控制层网络根据厂家的不同，多采用 ARCNET 令牌总线网、RS-485 串行总线网、工业以太网和 LonWorks 现场总线网等。

基于 BACnet、LonWorks 的 BMS 集成应用方案如下所示。

(1) LonWorks 方案。一种基于 LonWorks 的 BMS 集成方案，如图 7.1 所示。

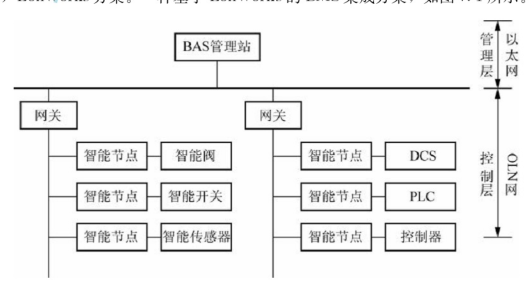


图 7.1 一种基于 LonWorks 的 BMS 集成方案

LonWorks 现场总线技术 LonWorks 网以具有智能控制功能的智能节点组成平等的一级全分布式网络结构，节点之间定义相互的关联关系，将系统的庞大控制关系转变成节点之间的互动关系，能真正实现全分布式控制网络系统。

LonWorks 现场总线网与管理层以太网的连接 LonWorks 现场总线网与管理层以太网之间通过专用的 LNS 网关实现连接。

（2）BACnet 方案。一种基于 BACnet 的 BMS 集成方案如图 7.2 所示。

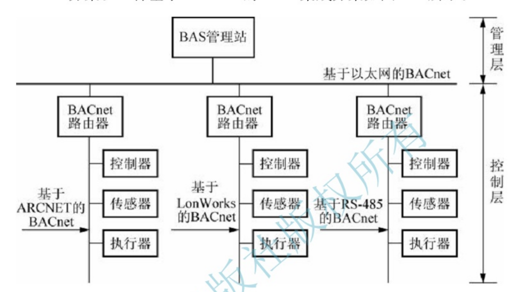


图 7.2 一种基于 BACnet 的 BMS 集成方案

BACnet 是一种用于多种物理网（ARCNET、LonWorks、RS-485、RS-232C 及以太网）互联的网络通信协议，定义了 4 层协议：物理层、数据链路层、网络层和应用层。在物理层和数据链路层上，除定义了数据链路层 MS/TP 主从令牌协议外，其他都是采纳现有物理网的相应协议。BACnet 定义了自己的网络层和应用层协议。BACnet 许可的异种物理网络之间可通过 BACnet 路由器实现互联。

BACnet 标准为应用广泛的分布控制和监控提供了解决方案。它管理所有建筑物设备的通信，如包括采暖、通风、制冷、火灾报警、保安、照明、动力等。它包含表示监控设备的配置和操作的模型，在设备间交换信息和应用局域网和广域网技术传递 BACnet 信息的规范。BACnet 服务（信息）包括报警和事件服务、文件访问服务、对象访问服务、远程设备管理服务和虚拟终端服务，因此 BACnet 特别适合于智能建筑中不同设备监控子系统之间的互联集成，即 BMS 系统集成。

7.2.2 系统集成的设计原则与步骤

1. 系统集成的目标

智能化大楼系统以结构化综合布线为基础，包含楼宇自动化控制系统（BAS）、通信自动化系统（CAS）、办公自动化系统（OAS）。上述三大系统既各成一套独立的完善系统，又具备一定的开放性，可实现数据的共享，相互间经授权可作中分功能的监视和控制。其中 BA 又分为基本楼宇自动化控制系统（BAS）、保安报警系统（SAS）、消防报警系统（FAS）

3个部分。要求“BA、FA、SA”上设 Data Server，作为数据仓库，存放各种数据。“BA、CA、OA”3大系统的集成由数据仓库(Data Server)完成。所以系统集成的核心在于科学地、合理地设置 Data Server，以满足用户提出的以下要求。

(1) 通过软件开发，在 Data Server 上提供一套接口界面管理软件，实现 BA 工作站、FA 工作站、SA 工作站的综合管理功能，采用图形界面，便于调用数据浏览。

(2) 提供通信程序使 Data Server 与 BA、FA、SA 的工作站实时交换全部。Data Server 收集报警资料、报告制表等数据。

(3) 在 OA 工作站上，授权可以 Web 方式调用 Data Server 的有关住处，如历史记录、报警资料、报告制表等数据。

(4) Data Server 在各子系统 BA、FA、SA 报警时，通过 CA 系统自动拨号。

(5) 系统联动。

① 发生火灾时，FA 系统向 BA 工作站 Data Server 发报警信号，BA 工作站根据设定的选项自动控制配电系统、照明系统、电梯系统、紧急广播系统、排风系统、门禁系统、电视监视系统进行联动，同时通过 CA 系统发出指令寻呼。

② 发生保安报警时，SA 系统向 BA 工作站、Data Server 发出报警信号，BA 工作站根据预设的功能，自动控制照明系统、门禁系统、电视监视系统、电梯系统进行联动，同时经 CA 系统拨号寻呼。

(6) 计算机硬盘记录摄像头监视图像，OA 工作站授权可查看报警处的实时图像(3帧/s)。

(7) OA 系统软件中实现对 BA 系统的监视和 BA 部分功能的控制，比如制订会议计划后，能自动将指定会议室的空调、灯光、门锁在指定时间开关。

(8) OA 系统能统计、分析 CA 系统信息，如：各部门、各话机每月话费等。此外，系统集成中还需达到：硬件和软件的保障措施，使 Data Server 及中央工作站工作可靠，迅速故障恢复。比如：双机热备份、镜像备份、数据服务器群等措施；编程软件对用户公开，便于日后控制功能变化、调整、扩展等。

总之，智能建筑系统集成的目标如下：

(1) 实现各子系统的联动，使各子系统之间能够协同动作，增强整个智能化系统的突现性。

(2) 实现资源的共享，提高设备的利用率，节省投资。

(3) 实现信息共享，充分发挥信息综合利用的效果，方便管理和决策，提高服务的质量。

特别提示

智能大厦系统集成重点没有突出，就达不到节能等相关指标，据统计中央空调系统、弱电系统和发配电系统占智能化建筑电气系统总投资的87%以上。因此，对该部分的资源进行有效的优化配置，对降低大厦建筑电气设备的节能和投资有重要的意义。

2. 系统集成的原则

为了达到上述目标，在进行系统集成设计时，应遵守如下的几个原则。

1）可行性和必要性

（1）系统集成是高效物业管理的客观要求。系统集成可以把建筑物内各个子系统采用同一操作系统的计算机平台，用统一的监控和管理的界面环境，在同一监控室内进行监视和控制操作，减少管理人员的人数，提高管理效率，同时降低对管理者素质的要求，降低人员培训的费用，加强事件综合控制的能力，使物业管理现代化。

（2）集成系统能为管理者提供统一的指挥和协调能力。通过软件编程和功能模块设计，智能建筑集成管理软件提供弱电系统整体的联通逻辑，从而提高了全局事件的控制能力，以保证人身及设备安全。

（3）开放的数据结构有利于共享信息资源。集成管理系统的建立提供了一个开放的平台，采集、传输各子系统的数据，建立统一的开放的数据库，使信息系统根据功能的需要自由地选择所需要的数据，充分发挥其强大的功能，提高这些信息的利用率，发挥增值服务的功能。

（4）系统集成是智能建筑系统工程建设的需要。智能建筑不是各种产品和子系统的堆集，而是利用系统工程方法和系统工程技术使各厂家产品充分发挥他们的功能，集成为一个具有高效服务、便于管理和使用的应用系统，充分发挥综合应用的优势。

（5）充分考虑高新技术的发展，为其发展提供足够的适应性、灵活性和可扩展性。任何大系统工程的投资都是十分巨大的，尽量增加其生命周期有着重大的现实意义。为保护投资者在该项目整个生命周期内的利益，系统集成能灵活地适应变化着的、不断发展的各种需求。

2）以人为本

系统集成的以人为本，即满足用户需求是智能建筑弱电系统工程设计应首先考虑的重要因素。这一点往往容易被忽视，因为业主一般注重建筑物的结构外形、内装与外装、设备与材料等，而把弱电放在最后考虑。

满足用户需求要注意以下几方面。

（1）确定智能化的目标。建筑智能化系统首先是为了提供安全、舒适、快捷的服务，使系统具有先进与科学的综合管理机制，可以提高工作效率，节省能源消耗并降低成本，从而使建筑物的竞争力得到增强。

（2）明确投资与回报。建设初期，建设方对智能建筑弱电系统的技术要求往往不是很明确，在听取大量建筑承包商、设备供应商、系统集成商介绍以后建设方才有所了解。大厦建成之后的管理费用有四大项：能耗费、管理人员费、设备维修保养费、通信费用。

3）使用与管理的原则

设计是使用的基础。设计者如果没有弱电系统全面的设计和管理经验，往往会走弯路，给建设方与管理方造成诸多不便。因此，要求设计者必须本着便于使用与管理的原则进行设计。一般要考虑以下几个方面。

（1）设计深度。设计深度是要根据用户需求而定。用户需求应该有具体的要求。如果建设方实在提不出要求，可以找几个类似的系统供参考。

（2）实用性。系统必须能够适应现代和未来技术的发展，着重解决建筑的主要实际问

题。要区分哪些功能是最重要的，哪些功能是今后可以加的。从管理的角度出发应明确自动化与人工管理的界面。

(3) 可靠性。这是智能建筑弱电系统很关键的问题。在选择系统时，不能一味追求最先进，还要考虑它的成熟度。硬件设备与使用技术必须是成熟可靠的。

(4) 先进性。在选用系统时，向主流技术靠近，保证系统整体的先进性，而不是单单看重某个设备是否先进。

3. 系统集成的步骤

(1) 系统集成分析。智能建筑的系统集成就是根据用户提出的需求优选各种技术和产品，通过分析选择构架连接成一个完整系统解决方案的过程。系统集成的本质就是通过分析，优化组合达到资源共享，并体现出系统集成后的附加值。

系统集成分析主要包括两个方面：设备和信息的集成分析。所谓设备集成是指通过相似或兼容的技术使不同系统在同一技术平台上实现；所谓信息集成是指不同系统之间往往需要交换信息，或需要综合多个系统提供的信息作出判断，这就要求不同系统之间的信息能够共享。

(2) 系统设计。系统集成设计分初步系统设计和深化系统设计两个阶段。

① 初步系统设计。初步系统设计主要是根据用户需求，对系统需求、建设目标、技术方案及各子系统作出概略的功能描述；对系统总体设计与设备选型以及工程施工要求作出建议；对建设总经费作出概预算，以便建设方决策。

② 深化系统设计。系统的深化设计是对初步设计方案的修改、细化和补充。在深化设计方案中至少应包括用户需求详细说明、方案设计技术说明、系统总体架构及各系统间的关联分析、各子系统的功能描述及实现方法、设备选型分析及所选设备的功能和性能说明、设备清单、工程进度计划、工程安装施工图、系统测试及验收方式、设备及工程经费预算、工程保障措施、培训及服务计划。

(3) 系统实施与评价。

(4) 系统管理维护。

7.3 建筑智能化子系统的集成模式

智能建筑系统集成模式一般可分为两个集成层次：第一层是对楼宇综合管理层的中央集成；第二层是各个子系统的集成，也就是说首先在 BA、CA、OA 三个子系统上集成，形成 3S 系统(楼宇管理系统 BMS、办公自动化系统 OAS、通信与网络系统 CNS)三个独立的子系统以后在 3S 基础上再次集成，而这次集成是以提高效率为目标的高层次集成。第一层的集成是满足楼宇管理功能的需要；第二层集成是满足楼宇服务功能的需要。在实际使用过程中集成的方式不尽相同，一般根据工程的实际需要集成，但是性质都属于这两种集成模式。

根据智能建筑工程的具体系统环境和集成要求，建筑智能化子系统之间常采用以下几种集成模式。

7.3.1 一体化集成模式

一体化集成模式就是要建立智能建筑综合管理系统 IBMS，智能建筑综合管理系统 IBMS示意图如图 7.3 所示。IBMS 把各子系统 BMS、OAS、CNS 从各个分离的设备功能和信息等集成到一个相互关联的统一协调的系统中，以便对各类信息进行综合管理。一体化集成使整个大厦内采用统一的计算机操作平台，运行和操作同一界面下的软件以实现集中监视、控制和管理功能。IBMS 是系统集成的高级阶段，但是一个真正完整的 IBMS 实现较为复杂，系统造价很高。

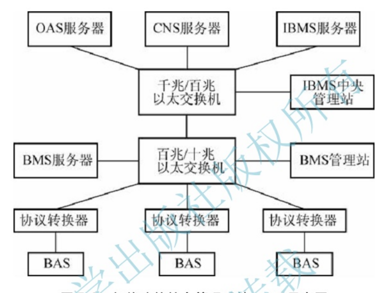


图 7.3 智能建筑综合管理系统 IBMS 示意图

7.3.2 以 BA 和 OA 为主，面向物业管理的集成模式

这种集成模式是将 BMS、OAS 以及智能一卡通系统、程控电话系统等进行集成，完成 OAS 及 BMS 的紧密集成，如图 7.4 所示。其中属于 OAS 的物业管理系统(FIVIS)包括租赁管理、维护管理、收支管理、访客管理及电子公告牌、电子邮件、会议室安排、多媒

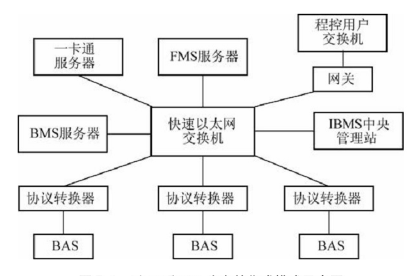


图 7.4 以 BA 和 OA 为主的集成模式示意图

体信息查询等功能；BMS 管理建筑设备的自动监控，这些建筑设备包括电力、照明、电视监控、智能卡、火灾报警、安全防范、PABX 费用计费器、电子公告牌、停车场等设备；对 CNS 只集成了 PABX 的计费功能。

7.3.3 BMS 集成模式

BMS 实现 BAS 与火灾自动报警系统、安全防范系统之间的集成，如图 7.5 所示。这种集成一般基于 BAS 平台，增加信息通信、协议转换、控制管理模块，主要实现对于 FAS、SAS 的集中监视与联动。各类子系统均以 BAS 为核心，运行在 BAS 的中央监控计算机上，满足基本功能，实现起来相对简单，造价较低，可以很好地实现联动功能。国内目前大部分智能建筑采用的就是这种集成模式。

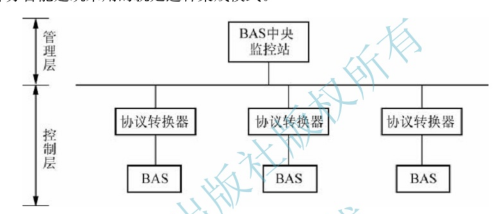


图 7.5 BMS 集成模式示意图

7.3.4 子系统集成

所谓子系统集成是指对 OAS、CNS、BAS 三个子系统设备各自的集成，这也是实现更高层次集成的基础。

(1) OAS 集成实质上是把不同技术的办公设备用联网方式集成为一体：将语言、数据、音像、文字处理等功能组合成一个系统，使办公室具有处理和利用这些信息的能力来提高日常事务处理和行政管理科学化、高效率。

(2) CNS 集成将程控电话系统、数据通信与计算机网络系统、音像系统、卫星通信系统等以 PABX 为核心进行集成。

(3) BAS 集成采用集散控制系统或现场总线控制系统，上层由中央监控计算机进行监视管理，下层由 DDC 进行现场控制，需要集成的供配电系统、照明系统、暖通空调系统、给排水系统可通过 DDC 直接集成到系统内。

特别提示

智能建筑系统集成的阶段和目标：智能大厦的设计是以智能建筑的中央监控管理系统为核心，围绕着各个子系统与核心的关系而展开，在此基础上进一步做好接口、协调和界面等细节设计。目前，我国智能大厦系统集从子系统功能集成到控制系统与控制网络集成，到目前的信息系统与信息网络集成。

7.4 系统集成下的通信标准

从理论上讲，智能建筑的自动控制系统明显属于过程控制范畴，凡适用于过程控制的标准通信协议均适用于智能建筑。因此在建筑自动化领域建立了多种开放式的标准通信协议，采用开放式标准开发的开放式系统是实现设备及子系统之间无缝连接的最好办法。

所谓开放式系统即系统所有部件均以公开的工业标准技术制造。系统符合公开的工业结构，因而不同厂商的产品，可以组合从而实现互操作，可以实现不同设备及系统无缝连接，它具有3个特点：一是系统的技术规范是所有厂商共同遵守的；二是同样功能的部件虽由不同厂家生产，但可以互相替换，可以互操作；三是符合标准的系统之间可以直接互联。

采用开放式标准实现互联是目前各建筑设备自动化子系统集成的主要方式，通常采用两种开放性国际标准：LonMark 标准和 BACnet 标准，除上述两个主要标准协议外，还有OPC，ODBC 等。

7.4.1 LonMark 标准

由美国埃施朗公司1991年提出的 LonMark 标准在当今世界控制技术领域已获得业界认可与广泛应用。目前，LonMark 标准及其产品已成功地应用于许多领域，其中楼宇自动化、小区自动化、交通自动化及工业自动化是四大主要市场。

1. LonMark 标准及其开放性

LonMark 标准是以 LonWorks 技术为基础的一套标准，LonWorks 控制网络技术以其开放性、灵活性、低成本、开发迅速的特点在楼宇自动化、工业自动化和家庭自动化等方面取得了令人瞩目的成绩。1993年在世界范围推广，其发展速度远远超过其他任何一种现场总线(如 CANBUS、ProfiBus 等)。

其应用在智能建筑中(大型宾馆、饭店、写字楼、现代高档住宅)的建筑设备自动化系统(BAS)、工业自动化、航空航天技术等领域，但有50%以上的节点用于建筑物自动化领域。由于不同的 OEM 虽然都按 LonWorks 技术制造产品，但由于在一些技术细节上不统一，因而不能互操作。为了解决这个问题，180家重要的 OEM 组成了 LonMark 可互操作协会，编制了一系列 LonMark 标准，使每个技术细节都有标准文件的严密规定。

LonMark 协会分有暖通空调组、家用设备组、照明组、工业组、本质安全组、网络管理组等，每个组都在制订一系列 LonMark 标准，称为功能概述，详细地描述了应用层接口，包括网络变量、组态特点以及网络节点加电状态等，把产品功能加以标准化。1997年3月，第一次公布的暖通空调组编制的标准，包括有温度、相对湿度、二氧化碳检测、风门执行器、屋顶单元控制、变风量控制。其后，又陆续编制了恒温控制器、冷冻机、单元通风器、墙挂式检测器、阀门执行器、报警及报警管理、数据记录及趋势分析等。

2. LonMark 标准在智能建筑 BAS 中的应用

智能大厦楼宇自控系统主要是用来对暖通空调、给排水系统、供配电、动力设备和照

明设备进行监视、控制和测量。其网络结构模式分为集散式及分布式控制方式，由管理层网络与监控层网络组成，实现对设备运行状态的监视和控制。

目前，在国际上常用的 BAS 主流产品，如 Honeywell 公司的 Excel 5000 系列及 EBI 系统，西门子公司的 S700APOGEE 系统，瑞典 TAC 公司的 Vista 系统等均已应用 LonWorks 技术。LonWorks 技术由于它的开放性、互操作性、可靠性、无中心控制等突出优点已被世人所公认，也被越来越多的 BAS 产品所采用。目前，正向全分布式 LonWorks 系统及用以太网作为主干线的全分布式 LonWorks 系统发展。

3. LonWorks 技术在小区及智能家居中的应用

目前在我国正在蓬勃发展的智能小区及家庭智能化技术主要包括防盗、紧急求助、煤气泄漏探测以及对电、水、煤气等三表的自动抄表计量。

在智能住宅建设中应用 LonWorks 技术，可以很容易地实现智能化住宅的所有功能，整个网络结构相对简单，网络布线相对容易。对于用户各种不同的功能要求，只需选用不同的控制节点，编写相应程序，直接连接到住宅区的控制网络上就完成了，在物理上不必对网络结构做任何修改。而且 LonWorks 网络可扩充性极好，增强功能。LonWorks 技术提供的高效开发平台让我们在进行系统设计和开发时对网络通信不再需要花费时间，可以把精力集中到具体的系统功能实现上，使得我们能在较短时间内针对具体任务设计出成熟稳定的系统。

由于 LonWorks 技术的开放性，产品的选择多样化，网络规模大小灵活，使得我们可以选择各种网络设备，包括国产的节点、路由器等产品，这样就能以最合理的价格组建符合要求的 LonWorks 网络，有效控制成本。无论是系统升级，或是新系统设计，可以形成不同档次的实用系统，根据客户的需求提出最贴切的实施方案，满足各层次用户的需求，并能方便地对用户节点进行修改和升级。

基于 LonWorks 技术良好的扩充性、易维护性，使得我们完全能在现有基础上增加新的功能，实现住户家电控制，家居环境控制，以及小区周边环境控制，如系统供电设备、公共照明、蓄水及消防水箱、背景音响、电梯、草地喷淋集中监测控制，停车场控制等，对于客户的各种档次要求都能在原有网络中实现。

4. LonMark 今后发展方向

以 LonWorks 技术为核心的 LonMark 标准将被世界更多标准组织认证与认可。Echelon 公司的 LonWorks 技术已经应用于数千家设备和系统生产厂商的产品中，遍及全世界的楼宇、工厂、家庭等领域，成为世界日用电器和控制设备网络化方面重要的跨行业标准，并被世界标准组织——包括 AAR、ANSI、ASHRAE、IEEE、SMEI 认证为各自的行业标准。

LonWorks 技术将人们的生活带入 Internet 时代，使我们居住的世界成为网络化的世界。这不仅是指计算机网络的相互连接已经形成国际互联网，还指在我们身边的楼宇、家庭等系统中，存在着由日用电器互相连接构成的无形网络。

7.4.2 BACnet 标准

BACnet 协议——楼宇自动控制网络数据通信协议（A Data Communication Protocol

for Building Automation and Control Networks，简称《BACnet 协议》)，是由美国暖通、空调和制冷工程师协会(ASHRAE)组织的标准项目委员会 135P 历经八年半时间开发的。协议是针对采暖、通风、空调、制冷控制设备所设计的，同时也为其他楼宇控制系统(例如照明、安保、消防等系统)的集成提供一个基本原则。BACnet 标准主要是管理层的一个开放式标准。BACnet 比 LonWarks 有更强的数据通信能力，是可以实现不同厂家 BAS、FAS、SAS 产品之间互联的网络通信技术。

自 20 世纪 80 年代出现第一幢智能建筑以来，智能建筑就在世界各国得到了迅猛发展。经过 20 多年的实践和探索，智能建筑的功能不断补充和完善，实现技术不断更新和成熟。随着现代信息技术的发展，智能建筑系统仍将不断采用最新技术进行系统集成。放眼世界，纵观全球智能建筑产业的发展趋势，在所有的智能建筑集成技术中，BACnet 标准以其先进的技术、完善的体系结构和开放的理念迅速得到了广泛的推广和应用，并正式成为建筑智能化系统领域中的唯一的 ISO 标准(的 ISO 17484－5)。

1. BACnet 标准的基本特点

BACnet 标准的基本目标有两个：一是在技术上定义一个开放的楼宇自控系统结构，实现不同系统间的互联和互操作；二是在应用上可以使用户(业主)可以自由选择自控厂商和系统集成商，寻求具有最优竞争力的产品和服务，使系统维护和升级不局限于特定的厂商，从而保护用户的投资。

从 BACnet 标准实现的目标来看，BACnet 标准就是定义了一个开放的技术平台或环境，所有楼宇自控厂商不需要得到授权或委托，均可以直接进入这个开放的平台或环境，并参与竞争。在 BACnet 标准定义的平台或环境中，竞争是完全公平的，没有其他专有标准的限制，从而促进楼宇自控产业有序地健康发展。

BACnet 标准从正式诞生到成为 ISO 标准，用了不到 10 年的时间。这充分说明了 BACnet 标准符合楼宇自控领域发展的规律，代表着楼宇自控领域的发展方向。归纳起来，BACnet 标准具有如下基本特点。

(1) 专用于楼宇自控网络，具有高效的特点。BACnet 标准是专门为楼宇自控网络制订的标准，定义了许多楼宇自控系统所特有的特性和功能。与其他标准相比，BACnet 标准具有高效的优点。

(2) 完全开放，技术先进。BACnet 标准是由非营利学会制订的标准，具有完全的开放性和广泛的参与性，从而使 BACnet 标准可以博采众长，不断注入新技术，始终代表楼宇自控领域的最高技术水平。

(3) 具有良好的互联特性和扩展性。BACnet 标准虽然从体系结构上定义了不同的局域网络，但 BACnet 标准可以扩展到其他任意通信网络。例如，BACnet/IP 标准可以实现与 Internet 的无缝互联。

(4) 具有良好的伸缩性。BACnet 标准没有限制 BACnet 系统中设备节点的数量，BACnet 集成系统可以由几个设备节点构成一个极小的自控系统，也可以形成一个规模极大的超级大系统。如美国 GAS 集成的 GEMnet 系统，该系统具有 11 个楼宇自控系统，集成总建筑面积达 $180\times10^4\,m^2$，横跨 3 个州。

(5) 应用领域不断扩展。BACnet 标准最初仅用于暖通空调设备系统。由于 BACnet

标准具有良好的互联性、互操作性和扩展性，在开放模式环境下，该标准的应用领域不断扩展。目前该标准已广泛应用于楼宇设备的各个领域，如给排水系统、照明系统、安保系统等。

2. 我国推广和应用 BACnet 标准的意义

我国是一个建筑业大国，也就必然存在着对智能建筑产品和系统的大量需求，智能建筑产品和系统集成必将形成一个超级大市场。中国加入 WTO，北京 2008 年举办奥运会，以及上海世博会等，均使中国智能建筑市场充满极大的商机和挑战。面对巨大的市场，我国楼宇自控产业只有采用国际标准并与国际接轨，才能迎接挑战。

目前，我国的城市建设正在向现代化、智能化、安全化的方向发展。楼宇智能化、安全化的水平不仅是衡量一个建筑或小区是否现代化、国际化的重要标准，而且也是衡量一个区域或一个国家科技水平的重要标准。在中国经济高速发展的基础上，当今的中国正在迎来一个“数字城市”、“数字社区”建设与发展的热潮。

BACnet 标准是楼宇自控领域唯一的 ISO 标准，已在北美和欧洲等先进发达国家得到了全面的推广和应用。随着 BACnet 标准应用广度不断的扩展，该标准必将在全球范围内得到推广和应用。这是大势所趋，同时必将在全球范围内形成一个规模巨大的产业和市场。预言近几年内亚太地区将是 BACnet 标准产品需求增长最快的地区。因此在我国大力推广和应用 BACnet 标准是完全必要的，也是急需的。

3. BACnet 系统集成方法

BACnet 系统集成是 BACnet 标准在工程项目中的具体应用，它涉及 BACnet 自控网络组成、BACnet 自控产品选型和资源配置等。这些具体内容在 BACnet 标准没有明确规定，但定义了用于描述互联和互操作的基本概念和原理。因此，BACnet 系统集成因不同的厂商可以采用不同的集成方法，尤其在自控产品选型和资源配置方面存在较大的区别。但只要掌握了 BACnet 标准定义的基本概念和原理，就可以较为容易地进行 BACnet 系统集成。总之，利用 BACnet 标准进行楼宇自控系统的集成是非常灵活的，在厂商提供的软件工具帮助下可以很容易地进行网络配置。

7.4.3 OPC 技术

1. OPC 技术简介

由 OPC Task Force 制订的 OPC(OLE for Process Control)规范于 1997 年 8 月正式诞生了，随着 1997 年 2 月 Microsoft 公司推出 Windows95 支持的 DCOM 技术，1997 年 9 月新成立的 OPC Foundation 对 OPC 规范进行修改，增加了数据访问等一些标准，使 OPC 规范得到了进一步的完善。

OPC 是将 Microsoft 公司的 OLE 和组件对象模型技术应用于过程控制领域并涉及接口技术的标准。它的出现为基于 Windows 的应用程序和现场过程控制应用建立了桥梁。在过去，为了存取现场设备的数据信息，每一个应用软件开发商都需要编写专用的接口函数。由于现场设备的种类繁多，且产品的不断升级，往往给用户和软件开发商带来了巨大的工作负担。通常这样也不能满足工作的实际需要，系统集成商和开发商急切地需要一种

具有高效性、可靠性、开放性、可互操作性的即插即用的设备驱动程序。

将 OPC 技术应用于智能建筑弱电系统的集成将带来以下好处：一是系统开放——对于由不同软、硬件厂商提供软件及硬件设备的情况，只要它们提供遵循 OPC 标准的接口，那么这个系统就是开放的系统；二是即插即用——在设备制造厂商和软件销售商都支持 OPC 规范的场合，所有的设备和软件都具备即插即用的功能；三是结构灵活——整个系统是模块化的结构，子系统的加入很容易实现，这对于系统的升级和修改非常方便。

在目前的大多数分布式系统常用的客户/服务器结构中，没有设备接口的通用标准，不同的应用程序为不同的设备都要编写驱动器软件，在这种模式下，各个厂家都按照自己的标准来开发设备驱动器和应用软件而没有标准的接口，所以要做到系统的集成是非常困难的。而在统一的 OPC 环境下，情况大为改观，由于各现场设备和各应用程序都使用了 OPC 标准作为其接口，各应用程序可以直接读取现场设备的数据；各现场设备也可以与不同的应用程序之间直接互联。这样，应用软件就可以做成插件式的，在系统的集成中就可以实现即插即用和无缝连接。

2. OPC 访问接口

OPC 服务器通常支持两种类型的访问接口，它们分别为不同的编程语言环境提供访问机制。这两种接口是自动化接口（Automation Interface）和自定义接口（Custom Interface）。自动化接口通常是为基于脚本编程语言而定义的标准接口，可以使用 Visual Basic、Delphi、PowerBuilder 等编程语言开发 OPC 服务器的客户应用。而自定义接口是专门为 C++ 等高级编程语言而制订的标准接口。OPC 现已成为工业界系统互联的缺省方案，为工业监控编程带来了便利，用户不用为通信协议的难题而苦恼。任何一家自动化软件解决方案的提供者，如果它不能全方位地支持 OPC，则必将被历史所淘汰。

3. OPC 技术规范

OPC 规范以 OLE/DCOM 为技术基础，而 OLE/DCOM 支持 TCP/IP 等网络协议，因此可以将各个子系统从物理上分开，分布于网络的不同节点上。OPC 按照面向对象的原则，将一个应用程序（OPC 服务器）作为一个对象封装起来，只将接口暴露在外面，客户以统一的方式去调用这个方法，从而保证软件对客户的透明性，使得用户完全从低层的开发中脱离出来。OPC 实现了远程调用，使得应用程序的分布与系统硬件的分布无关，便于系统硬件配置以及使得系统的应用范围更广。采用 OPC 规范，便于系统的组态化，将系统复杂性大大简化，可以大大缩短软件开发周期，提高软件运行的可靠性和稳定性，便于系统的升级与维护。OPC 规范了接口函数，不管现场设备以何种形式存在，客户都以统一的方式去访问，从而实现系统的开放性，易于实现与其他系统的接口。

4. OPC 技术的应用

由于 OPC 技术的采用，使得可以以更简单的系统结构、更长的寿命、更低的价格解决工业控制成为可能。同时现场设备与系统的连接也更加简单、灵活、方便。因此 OPC 技术在国内的工业控制领域得到了广泛的应用，主要应用领域如下。

1）数据采集技术

OPC 技术通常在数据采集软件中广泛应用。现在众多硬件厂商提供的产品均带有标

准的 OPC 接口，OPC 实现了应用程序和工业控制设备之间高效、灵活的数据读写，可以编制符合标准 OPC 接口的客户端应用软件完成数据的采集任务。

2）历史数据访问

OPC 提供了读取存储在过程数据存档文件、数据库或远程终端设备中的历史数据以及对其操作、编辑的方法。

3）报警和事件处理

OPC 提供了 OPC 服务器发生异常时，以及 OPC 服务器设定事件到来时向 OPC 客户发送通知的一种机制，通过使用 OPC 技术，能够更好地捕捉控制过程中的各种报警和事件，并给予相应的处理。

4）数据冗余技术

工控软件开发中，冗余技术是一项最为重要的技术，它是系统长期稳定工作的保障。OPC 技术的使用可以更加方便地实现软件冗余，而且具有较好的开放性和可互操作性。

5）远程数据访问

借助 Microsoft 的 DCOM(分散式组件对象模型)技术，OPC 实现了高性能的远程数据访问能力，从而使得工业控制软件之间的数据交换更加方便。

此外，OPC 技术对工业控制系统的影响及应用是基础性和革命性的，简单地说，它的作用主要表现在以下几个方面。

(1) 解决了设备驱动程序开发中的异构问题。OPC 解决了设备驱动程序开发中的异构问题。随着计算机技术的不断发展，用户需求的不断提高，以 DCS(集散控制系统)为主体的工业控制系统功能日趋强大，结构日益复杂，规模也越来越大，一套工业控制系统往往选用了几家甚至十几家不同公司的控制设备或系统集成为一个大的系统，但由于缺乏统一的标准，开发商必须对系统的每一种设备都编写相应的驱动程序，而且，当硬件设备升级、修改时，驱动程序也必须随之修改。同时，一个系统中如果运行不同公司的控制软件，也存在着相互冲突的风险。

有了 OPC 后，由于有了统一的接口标准，硬件厂商只需提供一套符合 OPC 技术的程序，软件开发人员也只需编写一个接口，而用户可以方便地进行设备的选型和功能的扩充，只要它们提供了 OPC 支持，所有的数据交换就都能通过 OPC 接口进行，而不论连接的控制系统或设备是哪个具体厂商提供的。

(2) 解决了现场总线系统中异构网段之间的数据交换。OPC 解决了现场总线系统中异构网段之间数据交换的问题。现场总线系统仍然存在多种总线并存的局面，因此系统集成和异构控制网段之间的数据交换面临许多困难。有了 OPC 作为异构网段集成的中间件，只要每个总线段提供各自的 OPC 服务器，任一 OPC 客户端软件都可以通过一致的 OPC 接口访问这些 OPC 服务器，从而获取各个总线段的数据，并可以很好地实现异构总线段之间的数据交互。而且，当其中某个总线的协议版本做了升级，也只需对相对应总线的程序做升级修改。

(3) 可作为访问专有数据库的中间件。OPC 可作为访问专有数据库的中间件。在实际应用中，许多控制软件都采用专有的实时数据库或历史数据库，这些数据库由控制软件

的开发商自主开发。对这类数据库的访问不像访问通用数据库那么容易，只能通过调用开发商提供的 API 函数或其他特殊的方式。然而不同开发商提供的 API 函数是不一样的，这就带来和硬件驱动器开发类似的问题：要访问不同监控软件的专有数据库，必须编写不同的代码，这样显然十分烦琐。采用 OPC 则能有效解决这个问题，只要专有数据库的开发商在提供数据库的同时也能提供一个访问该数据库的 OPC 服务器，那么当用户要访问时只需按照 OPC 规范的要求编写 OPC 客户端程序而无需了解该专有数据库特定的接口要求。

（4）便于集成不同的数据。OPC 便于集成不同的数据，为控制系统向管理系统升级提供了方便。当前控制系统的趋势之一就是网络化，控制系统内部采用网络技术，控制系统与控制系统之间也网络连接，组成更大的系统，而且，整个控制系统与企业的管理系统也网络连接，控制系统只是整个企业网的一个子网。在实现这样的企业网络过程中，OPC 也能够发挥重要作用。在企业的信息集成，包括现场设备与监控系统之间、监控系统内部各组件之间、监控系统与企业管理系统之间以及监控系统与 Internet 之间的信息集成，OPC 作为连接件，按一套标准的 COM 对象、方法和属性，提供了方便的信息流通和交换。无论是管理系统还是控制系统，无论是 PLC(可编程控制器)还是 DCS，或者是 FCS (现场总线控制系统)，都可以通过 OPC 快速可靠地彼此交换信息。换句话说，OPC 是整个企业网络的数据接口规范，所以，OPC 提升了控制系统的功能，增强了网络的功能，提高了企业管理的水平。

（5）使控制软件能够与硬件分别设计。OPC 使控制软件能够与硬件分别设计、生产和发展，并有利于独立的第三方软件供应商产生与发展，从而形成新的社会分工，有更多的竞争机制，为社会提供更多更好的产品。OPC 作为一项逐渐成形的技术已得到国内外厂商的高度重视，许多公司都在原来产品的基础上增加了对 OPC 的支持。由于统一了数据访问的接口，使控制系统进一步走向开放，实现了信息的集成和共享，使用户能够得到更多的方便。OPC 技术改变了原有的控制系统模式，给国内系统生产厂商提出了一个发展的机遇和挑战，符合 OPC 规范的软、硬件也已被广泛应用，给工业自动化领域带来了勃勃生机。

7.4.4 开放式数据库连接 ODBC

开放式数据库连接(ODBC)是用于访问数据在异类环境中的关系和非 Microsoft 的战略界面-关系数据库管理系统。基于 SQL 访问组 ODBC 规范提供了一种开放的、非特定于供应商的方法访问存储在各种专用的个人计算机、小型计算机和主机数据库中的数据的呼叫级别接口。

ODBC 是 Microsoft 提出的数据库访问接口标准。开放数据库互联定义了访问数据库的 API 一个规范，这些 API 独立于不同厂商的 DBMS，也独立于具体的编程语言，ODBC 规范后来被 X/OPEN 和 ISO/IEC 采纳，作为 SQL 标准的一部分，具体内容可以参看《ISO/IEC 9075－3：1995(E)Call－Level Interface(SQL/CLI)》等相关的标准文件。一个基于 ODBC 的应用程序对数据库的操作不依赖任何 DBMS，不直接与 DBMS 打交道，所有的数据库操作由对应的 DBMS 的 ODBC 驱动程序完成。也就是说，不论是 FoxPro、

Access 还是 Oracle 数据库，均可用 ODBCAPI 进行访问。由此可见，ODBC 的最大优点是能以统一的方式处理所有的数据库。

ODBC 工作起来和 Windows 一样，它用包含在 DLL 内的驱动程序完成任务。其实，ODBC 提供了一套两个驱动程序：一个是数据库管理器的语言，另一个为程序设计语言提供公用接口。允许 Visual C++用标准的函数调用经公用接口访问数据库的内容，是这两个驱动程序的汇合点。当然，还有其他和 ODBC 有关的实用程序类型的 DLL。例如，一个这样的 DLL 允许你管理 ODBC 数据源。它虽然没有提供数据库管理器和 C 之间尽可能最好的数据转换，这种情况是有的，但它多半能像广告所说的那样去工作。唯一影响 ODBC 前程的是，它的速度极低，至少较早版本的产品是这样。ODBC 最初面世时，一些开发者曾说，因为速度问题，ODBC 永远也不会在数据库领域产生太大的影响。然而，以 Microsoft 的市场影响力，ODBC 毫无疑问是成功了。今天，只要有两种 ODBC 驱动程序中的一种，那么几乎每一个数据库管理器的表现都会很卓越。

1. ODBC 的种类

从结构上分，ODBC 分为单束式和多束式两类。ODBC 使用层次的方法来管理数据库，在数据库通信结构的每一层，对可能出现依赖数据库产品自身特性的地方，ODBC 都引入一个公共接口以解决潜在的不一致性，从而很好地解决了基于数据库系统应用程序的相对独立性，这也是 ODBC 一经推出就获得巨大成功的重要原因之一。

1）单束式驱动程序

单束式驱动程序介于应用程序和数据库之间，像中介驱动程序一样数据提供一个统一的数据访问方式。当用户进行数据库操作时，应用程序传递一个 ODBC 函数调用给 ODBC 驱动程序管理器，由 ODBC API 判断该调用是由它直接处理并将结果返回还是送交驱动程序执行并将结果返回。由此可见，单束式驱动程序本身是一个数据库引擎，由它直接可完成对数据库的操作，尽管该数据库可能位于网络的任何地方。

2）多束式驱动程序

多束式驱动程序负责在数据库引擎和客户应用程序之间传送命令和数据，它本身并不执行数据处理操作而用于远程操作的网络通信协议的一个界面。前端应用程序提出对数据库处理的请求，该请求转给 ODBC 驱动程序管理器，驱动程序管理器依据请求的情况，就地完成或传给多束驱动程序，多束式驱动程序将请求翻译为特定厂家的数据库通信接口（如 Oracle 的 SQLNet）所能理解的形式并交给接口去处理，接口把请求经网络传送给服务器上的数据引擎，服务器处理完后把结果发回给数据库通信接口，数据库接口将结果传给多束式 ODBC 驱动程序，再由驱动程序将结果传给应用程序。

2. Microsoft 的 MSDN 中的 ODBC

Mcrosoft 推出的 ODBC 技术为异质数据库的访问提供了统一的接口。ODBC 基于 SQL，并把它作为访问数据库的标准。这个接口提供了最大限度的相互可操作性：一个应用程序可以通过一组通用的代码访问不同的数据库管理系统。一个软件开发者开发的客户/服务器应用程序不会被束定于某个特定的数据库之上。ODBC 可以为不同的数据库提供相应的驱动程序。

ODBC 的灵活性表现在以下几个方面：应用程序不会受制于某种专用的 API ；SQL 语句以源代码的方式直接嵌入在应用程序中；应用程序可以以自己的格式接收和发送数据；ODBC 的设计完全和 ISO Call - Level Interface 兼容；现在的 ODBC 数据库驱动程序支持 50 多家公司的数据产品。

3. ODBC 的体系结构

ODBC 由四个部分构成：应用程序、驱动程序管理器、数据库驱动程序和数据源管理。

1）应用程序

应用程序的主要任务包括：连接数据源；向数据源发送 SQL 语句；处理多个语句从数据源返回的结果集；处理错误和消息；断开与数据源的连接。

2）驱动程序管理器

驱动程序管理器是一个 Windows 环境下的应用程序，在 Windows 98 和 Windows NT 操作系统中的文件名为 ODBCAD32. exe。驱动程序管理器的主要作用是用来装载 ODBC 驱动程序，管理数据源，检查 ODBC 调用参数的合法性和记录 ODBC 函数的调用等。

3）数据库驱动程序

ODBC 应用程序不能直接存取数据库，其操作请求是由驱动程序管理器提交给数据库 ODBC 驱动程序，再通过驱动程序实现对数据源的各种操作，数据库的操作结果也通过驱动程序返回给应用程序。

驱动程序的任务包括：连接数据源；向数据源提交 SQL 语句；根据实际需要，对进出数据源的数据进行格式和类型转换；返回处理结果；将执行错误转换为 ODBC 定义的标准错误代码，返回给应用程序；根据需要定义和使用游标。

4）数据源管理

数据源(Data Source Name，DSN)是数据库驱动程序与数据库系统连接的桥梁，它为 ODBC 驱动程序指出数据库服务器，以及用户的默认连接参数等。所以，在开发 ODBC 数据库应用程序时应先建立数据源。ODBC 数据源分为三大类：

(1) 用户数据源。只有创建数据源的用户才可使用他们自己创建的数据源，所有用户不能使用其他用户创建的用户数据源。在 Windows NT 下以服务方式运行的应用程序也不能使用用户数据源。

(2) 系统数据源。所有用户和在 Windows NT 下以服务方式运行的应用程序均可使用系统数据源。

(3) 文件数据源。文件数据源是 ODBC3.0 以后版本添加的一种数据源，所有安装了相同数据库驱动程序的用户均可以共享文件数据源。文件数据源没有存储在操作系统的登录表数据库中，它们被存储在客户端的一个文件中。所以，使用文件数据源有利于 ODBC 数据库应用程序的开发。

创建数据源最简单的方法是使用 ODBC 驱动程序管理器。同样，重新配置或者删除数据源，也是通过 ODBC 驱动程序管理器。

本章小结

系统集成是将智能建筑内不同功能的智能化子系统在物理上、逻辑上和功能上连接在一起，以实现信息综合、资源共享。本章内容旨在让读者建立起建筑设备自动化系统集成的理念，重点介绍了系统集成的概念、智能楼宇监控中心的职能、基于BAS的布线技术、系统集成的模式等内容。

习　　题

一、填空题

1. 对于系统集成的解决方案，北美国家提出了以BAS为核心的__________，新加坡等地提出对建筑物中所有的弱电系统进行综合信息管理，推行__________和__________。

2. 通常监控中心要求环境安宁，宜设在主楼低层接近__________的地方，也可以设在地下一层。

3. BMS集成模式是实现BAS与__________和__________之间的集成。

4. 所谓子系统集成是指对__________、__________和__________三个子系统设备各自的集成。

5. __________标准是以LonWorks技术为基础的一套标准。

6. __________标准是楼宇自控领域唯一的ISO标准，已在北美和欧洲等先进发达国家得到了全面的推广和应用。

二、简答题

1. 简述系统集成的概念。
2. 简述智能化系统集成的功能。
3. 简述监控中心的功能用途。
4. 智能楼宇对监控中心的位置、环境有哪些要求?
5. 简述系统集成的设计原则与步骤。
6. 智能建筑子系统的集成模式有哪些?
7. 简述BACnet和LonWorks技术在系统集成中的优缺点。
8. 简述系统集成下的通信标准有哪些。
9. 绘制基于LonWorks和BACnet的BMS集成方案示意图。

参考文献

[1] 中华人民共和国国家标准．智能建筑设计标准(GB/T 50314—2006)[S]. 北京：中国计划出版社，2006.

[2] 中华人民共和国行业标准．民用建筑电气设计规范(JGJ 16—2008)[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2008.

[3] 王盛卫，徐正元．智能建筑与楼宇自动化[M]. 北京：中国建筑工业出版社，2010.

[4] 何志议．智能建筑中的楼宇自动化系统理论浅析[J]. 电工技术杂志，2004(8)：57-61.

[5] 胡崇岳．智能建筑自动化技术[M]. 北京：机械工业出版社，1999.

[6] 刘耀浩．建筑环境与设备控制技术[M]. 天津：天津大学出版社，2006.

[7] 李界家．楼宇设备控制系统[M]. 北京：中国电力出版社，2011.

[8] 张子慧．建筑设备管理系统[M]. 北京：人民交通出版社，2009.

[9] 卿晓霞，李楠，王波．建筑设备自动化[M].2 版．重庆：重庆大学出版社，2009.

[10] 洪滨，林春泉．智能建筑 BAS 设计应注意的若干问题[J]. 低压电器，2009(2).

[11] 王再英，韩养社，高虎贤．楼宇自动化系统原理与应用[M]. 北京：电子工业出版社，2008.

[12] 沈晔．楼宇自动化技术与工程[M]. 北京：机械工业出版社，2009.

[13] [瑞士]O. 嘎斯曼，[德]H. 梅尔斯纳．智能建筑传感器[M]. 陈祥光，姜波，曹鑫，译．北京：化学工业出版社，2005.

[14] 张九根，马小军，朱顺兵．建筑设备自动化系统设计[M]. 北京：人民邮电出版社，2003.

[15] 杨守权．建筑设备监控系统工程验收技术细则[J]. 智能建筑与城市信息，2005(3).

[16] 张青虎，岳子平．智能建筑工程检测技术——智能建筑工程检测规程应用指南[M]. 北京：中国建筑工业出版社，2005

[17] 杨守权．建筑设备监控系统的软件系统[J]. 电气应用，2005(12).

[18] 杨守权．建筑设备监控系统网络及控制器[J]. 智能建筑与城市信息，2006(1).

[19] 沈晔，程大章．建筑设备监控系统之空调/给排水系统设备的调试[J]. 智能建筑与城市信息，2005(3).

[20] 韩宝琦，李树林．制冷空调原理及应用[M]. 北京：机械工业出版社，1995.

[21] 邢振禧．高级制冷设备维修工[M]. 北京：机械工业出版社，2001.

[22] 朱瑞琪．制冷装置自动化[M]. 西安：西安交通大学出版社，1993.

[23] 王如竹，丁国良．制冷原理与技术[M]. 北京：科学出版社，2003.

[24] 陈芝久，吴静怡．制冷装置自动化[M]. 北京：机械工业出版社，2010.

[25] 牟连佳，杨丽萍．通信协议与 IT 技术在智能建筑系统集成中应用研究[J]. 计算机与数字工程，2006，35(3).

[26] 章云，许锦标．建筑智能化系统[M]. 北京：清华大学出版社，2007.

[27] 董春桥．智能楼宇 BACnet 原理与应用[M]. 北京：电子工业出版社，2003.

[28] 郭风雷．风机、水泵变频控制的设计和研究[J]. 建筑电气，2007(11).

[29] 陈虹．楼宇自动化技术与应用[M]. 北京：机械工业出版社，2007.

[30] 李贲．施耐德．PowerLogic 配电监控系统的应用[J]. 电气应用，2005(12).

[31] 张毅敏．建筑设备控制系统施工[M]. 北京：中国建筑工业出版社，2005.

[32] 马少华．楼宇设备自动控制[M]. 北京：中国水利水电出版社，2004.

[33] 程大章．智能建筑楼宇自控系统[M]. 北京：中国建筑工业出版社，2005.

高职高专『十二五』规划教材

土建施工

21世纪全国高职高专土建系列**技能型**规划教材



（第2版）

建筑材料与检测

梅 杨 夏文杰 于全发◎主 编

全新推出第2版

- 内容丰富、案例翔实、习题精选
- 依据最新建筑材料技术标准和规范修订
- 采用全新体例编写，注重理论与实践相结合







高职高专“十二五”规划教材

21 世纪全国高职高专土建系列技能型规划教材

建筑材料与检测

（第 2 版）

主　编　梅　杨　夏文杰　于全发

副主编　王美芬　周向阳　申淑荣

韩　龙　王　花　王智玉

徐姗姗　闫振林



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书反映当前建筑工程中应用建筑材料的最新动态，在首版基础上，编者依据我国最新修订的建筑材料技术标准和相关规范，对全书内容进行了修订。全书修订后共分 8 个学习任务，主要包括：绪论、建筑材料的基本性质、胶凝材料、混凝土、建筑砂浆、墙体材料、建筑钢材、建筑功能材料等内容。

本书采用全新体例编写。除附有部分工程案例外，还增加了任务导读、知识链接、特别提示及引例等模块。此外，还附有选择题、填空题、案例题及简答题等多种题型供读者练习。通过对本书的学习，读者可以掌握建设工程中典型建筑材料的基本性能特点和应用，具备合理分析选用建筑材料的能力。

本书既可作为高职高专建筑工程类相关专业的教材，也可作为土建施工类及工程管理类各专业职业资格考试的培训教材，还可供土建类一般工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

建筑材料与检测/梅杨，夏文杰，于全发主编. —2 版. —北京：北京大学出版社，2015.2
（21 世纪全国高职高专土建系列技能型规划教材）
ISBN 978-7-301-25347-2

Ⅰ. ①建…　Ⅱ. ①梅…　②夏…　③于…　Ⅲ. ①建筑材料—检测—高等职业教育—教材　Ⅳ. ①TU502

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2015）第 005470 号

书　　名　建筑材料与检测（第 2 版）
著作责任者　梅　杨　夏文杰　于全发　主编
策 划 编 辑　赖　青　杨星璐
责 任 编 辑　刘晓东
标 准 书 号　ISBN 978-7-301-25347-2
出 版 发 行　北京大学出版社
地　　址　北京市海淀区成府路 205 号　100871
网　　址　http://www.pup.cn　新浪微博：@北京大学出版社
电 子 信 箱　pup_6@163.com
电　　话　邮购部 62752015　发行部 62750672　编辑部 62750667
印 刷 者
经 销 者　新华书店
787 毫米×1092 毫米　16 开本　15.5 印张　354 千字
2010 年 8 月第 1 版
2015 年 2 月第 2 版　　2015 年 2 月第 1 次印刷（总第 10 次印刷）
定　　价　33.00 元

CONTENTS

目录

学习任务1

绪　　论

学习目标

了解建筑材料分类与作用，初步了解建筑材料的技术标准，熟悉典型建筑材料质量检测要求，掌握本课程的内容及任务。

学习要求

能力目标	知识要点	权重
了解建筑材料的地位和作用	建筑材料的地位和作用	20%
熟悉建筑材料的分类及技术标准	建筑材料的分类及技术标准	40%
掌握本课程的内容及任务	本课程的内容及任务	40%

知 识 点 滴

古代建筑对建筑材料的使用

1. 万里长城

长城总长度大约有5万千米以上，所用建筑材料有：土、石、木料、砖、石灰。关外有关、城外有城，其材料运输量之浩大、工程之艰巨世所罕见。万里长城的坚韧性集中体现了古代劳动人民对建筑材料的深刻认识，万里长城为建筑史上对建筑材料使用的典范(图1.1)。



图1.1 由多种材料建造而成的万里长城

2. 河北赵州石桥

赵州石桥建于1 300多年前(桥长约51m，净跨37m)，建造该桥的石材为青白色石灰岩，比意大利人建石拱桥晚400多年，但在主拱肋与桥面间设计“敞肩拱”方面比国外早了1 200多年(图1.2)。





图1.2 赵州桥局部与青白色石灰岩材料



引 例

2009年3月16日，中央美术学院学生宿舍发生火灾，大火持续1h之后才被扑灭。大火共烧毁100多间宿舍，现场过火面积近3 000m^2。一位目击者表示，大火蔓延的速度超过想象，十几分钟的时间就吞噬了整个宿舍楼(图1.3)。人们不禁质疑，究竟是什么原因导致火势蔓延如此

之快！有现场消防员表示，宿舍所用板内保温材料燃烧速度快，烟雾大，加之宿舍内易燃物较多，给火灾扑救带来一定难度。美院宿舍使用了大量的彩钢板和保温材料。而彩钢板燃烧快、烟雾毒性大，保温材料也存在在燃烧过程中产生大量烟雾的特点，且不耐燃。



图 1.3 中央美院火灾现场

北京消防部门表示：彩钢板燃烧速度快，产生的烟雾毒性大，不适合作为学生宿舍的建筑材料。

北京建工集团一位建筑专家表示：北京不禁止使用彩钢板搭建宿舍，但应尽可能用于搭建临时宿舍，一般时限为 5 年，例如工地工棚。他称，这种材料不适宜建设永久性建筑，而学生宿舍属于长时间使用的建筑，用彩钢板会存在一定安全隐患。

由此可见，对建筑材料性能的了解非常重要，只有针对建筑物的功能选取合适的建筑材料才能避免出现安全隐患。熟悉建筑材料的基本知识、掌握各种新材料的特性，是进行结构设计、施工管理的基础。

1.1 建筑材料的分类和作用

1.1.1 建筑材料的定义

建筑材料涉及面广泛，在概念上又没有明确而统一的界定。广义的建筑材料除包括构成建筑工程实体的材料之外，还包括两部分：一是施工过程中所需要的辅助材料，如脚手架、组合钢模板、安全防护网等；二是建筑器材，如给排水设施、电气设施等。而通常所指的建筑材料主要是构成建筑工程实体的材料，如水泥、混凝土、钢材、装饰材料、防水材料等，即狭义的建筑材料。

1.1.2 建筑材料的分类

随着材料科学和材料工业不断地发展，各种类型的新型建筑材料不断涌现，建筑材料种类繁多，通常按材料的化学成分、使用目的及其使用功能将建筑材料进行分类。

1. 按化学成分分类

根据材料的化学成分，可分为无机材料、有机材料以及复合材料 3 大类，见表 1-1。

表 1-1　建筑材料按化学成分分类

分　　类			材料举例
无机材料	金属材料	黑色金属	钢、铁及其合金、合金钢、不锈钢等
		有色金属	铜、铝及其合金等
	非金属材料	天然石材	砂、石及石材制品
		烧土制品	黏土砖、瓦、陶瓷制品等
		胶凝材料及其制品	石灰、石膏及其制品、水泥及混凝土制品、硅酸盐制品等
		玻璃	普通平板玻璃、特种玻璃等
		无机纤维材料	玻璃纤维、矿物棉等
有机材料	植物材料		木材、竹材、植物纤维及其制品等
	沥青材料		煤沥青、石油沥青及其制品等
	合成高分子材料		塑料、涂料、胶黏剂、合成橡胶等
复合材料	有机与无机非金属材料复合 金属与无机非金属材料复合 金属与有机材料复合		聚合物混凝土、玻璃纤维增强塑料等 钢筋混凝土、钢纤维混凝土等 PVC 钢板、有机涂层铝合金板等

2. 按使用目的分类

根据使用目的，可分为如下几类。

(1) 结构材料(建筑物骨架，如梁、柱、墙体等组合受力部分的材料)。如木材、石材、砖、混凝土及钢铁等。

(2) 装饰材料(如内外装饰材料、地面装饰材料)。如瓷砖、玻璃、金属饰面板、轻质板、涂料、粘铺材料、壁纸等。

(3) 隔断材料(以防水、防潮、隔声、隔热等为目的而使用的材料)。如沥青、嵌缝材料、玻璃及玻璃棉等。

(4) 防火耐火材料(以提高难燃、防烟及耐火性等方面为目的而使用的材料)。如防火预制混凝土制品、石棉水泥板、硅钙板等；此外，还有兼顾防火耐火及隔断两方面功能的装饰材料。

3. 按使用功能分类

根据建筑材料功能及特点，可分为建筑结构材料、墙体材料和建筑功能材料。

(1) 建筑结构材料主要是指构成建筑物受力构件和结构所用的材料。如梁、板、柱、基础、框架及其他受力件和结构等所用的材料。对这类材料的主要技术性能要求是强度和耐久性。目前，所用的主要结构材料有砖、石、水泥混凝土和钢材及后两者的复合物——钢筋混凝土和预应力钢筋混凝土。在相当长的时期内，钢筋混凝土和预应力钢筋混凝土仍

是我国建筑工程中的主要结构材料之一。随着建筑工业的发展，钢结构所占的比例将会逐渐加大。

(2) 墙体材料主要是指建筑物内、外及分隔墙体所用的材料，有承重和非承重两类。由于墙体在建筑物中占有很大比例，故认真选用墙体材料，对降低建筑物的成本、节能和使用的安全耐久等都是很重要的。目前，我国大量采用的墙体材料为砌墙砖、混凝土及加气混凝土砌块等。此外，还有混凝土墙板、石膏板、金属板材和复合墙体等，特别是轻质多功能的复合墙板发展较快。

(3) 建筑功能材料主要是指担负某些特定功能的非承重用材料。如防水材料、绝热材料、吸声和隔声材料、采光材料、装饰材料等。这类材料的品种、形式繁多，功能各异，随着国民经济的发展以及人民生活水平的提高，这类材料将会越来越多地应用于建筑物上。

一般来说，建筑物的可靠度与安全度，主要决定于由建筑结构材料组成的构件和结构体系，而建筑物的使用功能与建筑品质主要取决于建筑功能材料。此外，对某一种具体材料来说，可能兼有多种功能。

1.1.3 建筑材料在建筑工程中的地位和作用

建筑材料是一切建筑工程的物质基础，建筑业的发展也离不开建筑材料工业的发展。

(1) 建筑材料是建筑工程的物质基础。建筑的总造价中，建筑材料费用所占比重较大，一般超过 50%。因此，选用的建筑材料是否经济适用，对降低房屋建筑的造价起着重要的作用。正确掌握并准确熟练地应用建筑材料知识，可以通过优化选择和正确使用材料，充分利用材料的各种功能，在满足工程各项使用要求的条件下，降低材料的资源消耗或能源消耗，节约与材料有关的费用。从工程技术经济及可持续发展的角度来看，正确选择和使用材料，对于创造良好的经济效益与社会效益具有十分重要的意义。在建筑工程中恰当地选择和合理地使用建筑材料，不仅能提高建筑物质量及其寿命，而且对降低工程造价也有着重要的意义。

(2) 建筑材料的发展赋予了建筑物以鲜明的时代特征和风格。中国古代以木结构为主的建筑，当代以钢筋混凝土和钢结构为主体材料的超高层建筑，均体现了鲜明的时代感。

(3) 建筑设计理论的不断进步和施工技术的革新不但受到建筑材料发展的制约，同时也受到其发展的推动。大跨度预应力结构、薄壳结构、悬索结构、空间网架结构、节能建筑、绿色建筑的出现，无疑都是与新材料的产生密切相关的。

(4) 建筑材料的质量如何直接影响建筑物的坚固性、适用性和耐久性。建筑材料只有具有足够的强度以及与环境条件相适应的耐久性，才能使建筑物具有足够的使用寿命，并最大限度地减少维修费用。

建筑材料的发展是随着人类社会生产力的不断发展和人民生活水平的不断提高而向前发展的。现代科学技术的发展，使生产力水平不断提高，人民生活水平不断改善，这将要求建筑材料的品种和性能更加完备，不仅要求经久耐用，而且要求建筑材料具有轻质、高强、美观、保温、吸声、防水、防震、防火、节能等功能。

知识链接

近年来，我国建筑材料行业发展很快，目前主要建筑材料的产量和消耗量均已位列世界前列。2013 年我国粗钢产量达到 7.79 亿 t，几乎占据全球总产量的半壁江山；2013 年我国水泥总



产量近24.1亿t，商品混凝土产量达11.7亿m^3，平板玻璃产量7.8亿重量箱，建筑涂料产量为1271.875万t，均位居世界首位。我国已成为名副其实的建筑材料生产和消费大国。

1.2 建筑材料的技术标准

1.2.1 建筑材料技术标准的概念及作用

建筑材料的技术标准是生产和使用单位检验、确证产品质量是否合格的技术文件。为了保证材料的质量、现代化生产和科学管理，必须对材料产品的技术要求制定统一的执行标准。其内容主要包括：产品规格、分类、技术要求、检验方法、验收规则、标志、运输和储存注意事项等方面。

1.2.2 技术标准的级别与种类

1. 我国的技术标准

我国的技术标准划分为国家级、行业(或部)级、地方(地区)级和企业级4个级别。

1) 国家标准

国家标准由国家质量监督检验总局发布或其与相关国务院行政主管部门联合发布，标准分为强制性标准(代号GB)和推荐性标准(代号GB/T)。强制性标准是在全国范围内必须执行的技术指导文件，产品的技术指标都不得低于标准中规定的要求。推荐性标准在执行时也可采用其他相关标准的规定。工程建设国家标准(代号 GBJ)是涉及建设行业相关技术内容的国家标准。

2) 行业(或部)标准

各行业(或主管部)为了规范本行业的产品质量而制定的技术标准，也是全国性的指导文件。如建筑工程行业标准(代号JGJ)、建筑材料行业标准(代号JC)、冶金工业行业标准(代号YB)、交通行业标准(代号JT)等。

3) 地方(地区)标准

地方标准为地方(地区)主管部门发布的地方性技术指导文件(代号 DB)，适于在该地区使用。

4) 企业标准

由企业制定发布的指导本企业生产的技术文件(代号QB)，仅适用于本企业。凡没有制定国家标准、行业标准的产品，企业均应制定企业标准。企业标准所定的技术要求应不低于类似(或相关)产品的国家标准。

特别提示

在建设行业，中国工程建设标准化协会(CECS)主持制定发布的CECS系列工程技术标准是对建设行业国标和行业标准的重要补充。由于CECS标准的及时推出，许多工程建设中应用的新工艺、新方法和新材料得以进一步规范和推广。因此，有的CECS标准涉及的工艺、方法和材料会随着技术推广而被制定为行业标准甚至是国家标准。

2. 国际标准

随着我国经济和科技实力的提升，我国的各级技术标准已比较完善，并自成体系，但工程中还可能引用国外的技术标准，这些标准包括以下几条。

(1) 国际标准化组织制定发布的“ISO”系列国际化标准。

(2) 国际上有影响的团体标准和公司标准，如美国材料与试验协会的“ASTM”标准。

(3) 工业先进国家的国家标准或区域性标准，如德国工业的“DIN”标准、英国的“BS”标准、日本的“JIS”标准等。

1.2.3 技术标准的基本表示方法

我国标准的基本表示方法依次为标准名称、部门代号、编号和批准年份，如：国家标准(强制性)——《钢筋混凝土用钢　第 2 部分：热轧带肋钢筋》(GB 1499.2—2007)；国家标准(推荐性)——《低碳钢热轧圆盘条》(GB/T 701—2008)；建设行业标准——《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ 55—2011)；上海市工程建设地方标准——《预拌砂浆应用技术规程》(DG/TJ 08—502—2012)。

目前，建筑材料标准主要内容大致包括材料质量要求和检验两大方面。有的两者合在一起，有的则分开订立标准。在现场配制的一些材料(如钢筋混凝土等)，其原材料(如钢筋、水泥、石子、砂等)应符合相应的材料标准要求，而其制成品(如钢筋混凝土构件等)的检验及使用方法常包含于施工验收规范及有关的规程中。由于有些标准的分工细且相互渗透、关联，有时一种材料的检验要涉及多个标准、规范等。

1.3 建筑材料质量检测的有关规定

1.3.1 建筑材料质量检测要求

在建筑施工过程中，影响工程质量的主要因素包括材料、机械、人、施工方法和环境条件 5 个方面。为了保证工程质量，必须对施工的各工序质量从上述 5 个方面进行事前、事中和事后的有效控制，做到科学管理。要完成这样的目标，就必须做好检测工作，其中材料性能的检测和质量控制是必不可少的重要环节。为加强对建设工程质量检测的管理，根据《中华人民共和国建筑法》《建设工程质量管理条例》，2005 年建设部发布了《建设工程质量检测管理办法》(建质［2005］141 号)。凡申请从事对涉及建筑物、构筑物结构安全的试块、试件以及有关材料检测的工程质量检测机构资质，实施对建设工程质量检测活动的监督管理，应当遵守该办法。办法全文共 36 条，是进行建筑工程材料质量检测的基本依据法规文件。

1.3.2 见证取样及送样检测制度

建设工程质量的常规检查一般都采用抽样检查。正确的抽样方法应保证抽样的代表性和随机性。如何保证抽样的代表性和随机性，有关的技术规范标准中都做出了明确的规定。样品抽取后应将样品从施工现场送至有检测资格的工程质量检测单位进行检验，从抽取样品到送至检测单位检测的过程是工程质量检测管理工作中的第一步。为强化这个过程的监

督管理，杜绝因试件弄虚作假而出现试件合格而工程实体质量不合格的现象，建设部颁发的《建设工程质量检测管理办法》中也做了明确规定。在建设工程中实行见证取样和送样就是指在建设单位或工程监理单位人员的见证下，由施工单位的相关人员对工程中涉及结构安全的试块、试件和材料在施工现场取样并送至具有相应资质的检测机构进行检测。

1.3.3 建筑材料检测人员要求

(1) 检测人员必须持有相关的资格证书才能上岗。

(2) 检测人员必须严格执行有关标准、试验方法、操作规程及有关规定。

(3) 检测人员必须具有科学的态度，不得修改试验原始数据，不得假设试验数据，要对出具的检测报告的科学性和真实性负责。



建筑材料的性质并非固定不变，它会受环境因素干扰和影响而发生相应变化，有时甚至会发生根本性的转变。因此，结合建筑材料的实际使用状态来理解其性质和特点就显得十分必要。



建筑材料是构成建筑物和构筑物的物质基础，在建筑工程中占有重要的地位。本任务主要介绍建筑材料的分类、作用、主要的技术标准及各种建筑材料检测的有关规定。此外本任务还对教材内容做了简要的介绍，并对建筑材料质量检测的基本要求和方法原则进行了简介。

习 题

简答题

1．指出所居住场所或教室中常用建筑材料的种类和主要作用。

2．建筑材料按照化学成分如何进行分类？

3．分组讨论建筑材料检测中见证取样的必要性。

4．利用业余时间找到几种现行建筑材料的产品标准，了解建筑材料各级标准的基本内容和格式。

学习任务 2

建筑材料的基本性质

学习目标

通过了解建筑材料的基本性质，初步具备判断材料的性质和正确运用材料的能力，为后续章节的学习和正确选择、合理使用建筑材料奠定基础。

学习要求

能力目标	知识要点	权重
掌握材料的物理性质及特点	材料与质量相关的性质	20%
	材料与水相关的性质	30%
	材料的热工性质	10%
	材料的声学性质	5%
掌握材料的力学性质	材料的强度	15%
	材料的弹性与塑性	10%
	材料的脆性与韧性	5%
了解材料的耐久性	材料的耐久性	5%

任务导读

由于材料在建筑物中所处的部位不同，要求它们具有不同的功能，如梁、板、柱具有承重的功能，墙不但具有承重，还要具有保温、隔声的功能，屋面具有保温、防水的功能。为了能够正确选择、合理运用、准确分析和评价建筑材料，作为工程技术人员，必须熟悉建筑材料的性质。建筑材料的性质可归纳为如下几类：物理性质，包括基本物理性质及与各种物理过程(水、热作用等)有关性质；力学性质，材料在外力作用下的变形性质及强度；耐久性，材料抵抗外界综合因素影响的稳定性。

本章所讨论的是建筑材料的基本性质，也是一般建筑材料都具有的“共性”。学习中要掌握各项性质的含义，了解影响这些性质的因素和彼此间的关系，并联系工程实际应用去加深理解。



引　例

2009 年 2 月 9 日晚 8 时 27 分，在全国人民都在燃放焰火庆祝传统的元宵佳节时，央视新台址园区文化中心因为燃放焰火不当而引起一场大火。这场大火约 6 小时的燃烧使得这个还未来得及全面展示其风采的文化中心外立面受毁严重，给国家财产带来了重大损失，一幢如此雄伟的摩天大楼因为燃放焰火的小火星而烧毁，这给整个建筑装饰行业带来了极大的震撼(图 2.1)。



图 2.1　央视新台址园火灾现场

在建筑中为了表现建筑师的灵感，结构特异的高层建筑，一般是钢结构建筑或部分采用钢结构，就是大家习惯称之为的“摩天大楼”。可钢结构的致命弱点是怕火——建筑钢材是在严格的技术控制下生产的材料，具有强度大、塑性和韧性好、品质均匀、可焊可铆、制成的钢结构质量轻等优点，但就防火而言，钢材虽然属于不燃性材料，但是耐火性能却很差。

钢材不耐火的原因有如下几点。

(1) 其在高温下强度降低快。在建筑结构中广泛使用的普通低碳钢温度超过 350℃时，强度开始大幅度下降，在 500℃时强度约为常温时的 1/2，600℃时约为常温时的 1/3。冷加工钢筋和高强钢丝在火灾高温下强度下降明显大于普通低碳钢筋和低合金钢筋，因此预应力钢筋混凝土构件的耐火性能远低于非预应力钢筋混凝土构件。

(2) 钢材热传导率大，易于传递热量，使构件内部升温很快。

(3) 高温下钢材塑性增大，易于产生变形。

(4) 钢构件截面面积较小，热容量小，升温快。试验研究和大量火灾实例证明，处于火灾高温下的裸露钢结构往往在15分钟左右即丧失承载能力，发生倒塌破坏。所以，钢结构安装后会在表面喷涂一层厚厚的防火涂料，一般涂料保证的耐火时限为2～3小时，混凝土传热性没有钢材好，因此即使表面受到高温烘烤，内部的温度上升也会慢一点，受到火灾的损害比钢材要小。但如果没有产生高温或建筑材料采用了耐火不燃材料，没有热传导或热传导较小，钢结构的弱势影响也是可以减弱的。

案例小结

建筑材料的性质决定了建筑材料的使用范围，工程人员只有正确了解建筑材料的特点，才能充分发挥材料的功能，物尽其用，也只有正确地认识到建筑材料的缺点，才能采取有效的防范措施，避免事故的发生。

2.1 材料的基本物理性质

2.1.1 材料与质量有关的性能

1. 三种密度

1) 实际密度

实际密度(简称密度)是指材料在绝对密实状态下单位体积的质量，按下式计算：

$$\rho=\frac{m}{V} \tag{2-1}$$

式中 ρ——实际密度(g/cm^3)；

m——材料在干燥状态下的质量(g)；

V——材料在绝对密实状态下的体积(cm^3)。

绝对密实状态下的体积是指不包括材料内部孔隙在内的固体物质的体积。测定材料密度时，可采取不同方法。对钢材、玻璃、铸铁等接近于绝对密实的材料，可用排水(液)法；而绝大多数材料内部都含有一定孔隙时测定其密度时应把材料磨成细粉(至粒径小于0.2mm)以排除其内部孔隙，然后用排水(液)法测定其实际体积，再计算其绝对密度；水泥、石膏粉等材料本身是粉末态，就可以直接采用排水(液)法测定。

对于砂、石等外形不规则，材质坚硬、致密的散粒材料，在实际中常用排水法直接求出体积V'，作为其绝对体积的近似值(因颗粒内部的封闭孔隙体积没有排除)，这时所测得的实际密度为近似密度，即视密度(ρ')。

$$\rho'=\frac{m}{V'} \tag{2-2}$$

式中 ρ'——视密度(g/cm^{3}或kg/m^3)；

m——材料在干燥状态下的质量(g或kg)；

V'——材料在自然状态下的不含开口孔隙的体积(cm^{3}或m^3)。



2) 体积密度

体积密度(也称表观密度)是指材料在自然状态下单位体积的质量，按下式计算：

$$\rho_0 = \frac{m}{V_0} \tag{2-3}$$

式中 ρ_0——体积密度(g/cm³ 或 kg/m³)；

m——材料的质量(g 或 kg)；

V_0——材料在自然状态下的体积，或称表观体积(cm³ 或 m³)。

自然状态下的体积即表观体积，包含材料内部孔隙(开口孔隙和封闭空隙)在内。对外形规则的材料，其几何体积即为表观体积；对外形不规则的材料，可用排水(液)法测定，但在测定前，在待测材料表面用薄蜡层密封，以免测液进入材料内部孔隙而影响测定值。



材料孔隙内含有水分时，其质量和体积会发生变化，相同材料在不同含水状态下其表观密度也不相同，因此，表观密度应注明材料含水状态，若无特别说明，常指气干状态(材料含水率与大气湿度相平衡，但未达到饱和状态)下的表观密度。

3) 堆积密度

堆积密度是指散粒(粉状、粒状或纤维状)材料在自然堆积状态下单位体积的质量，按下式计算：

$$\rho_0' = \frac{m}{V_0'} \tag{2-4}$$

式中 ρ_0'——堆积密度(kg/m³)；

m——材料的质量(kg)；

V_0'——材料的堆积体积(m³)。

自然堆积状态下的体积即堆积体积，包含颗粒内部的孔隙及颗粒之间的空隙，如图 2.2 所示。散粒状材料的堆积密度通常使用容积升测定。测定时，先对容积升称重，然后在容积升中装满待测材料，称重。

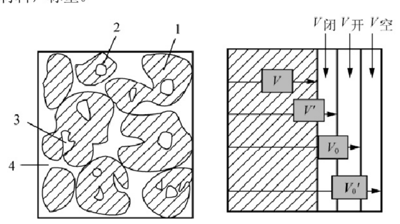


图 2.2 材料孔(空)隙及体积示意图

1—固体物质；2—闭口孔隙；3—开口孔隙；4—颗粒间隙

在建筑工程中，计算材料用量、构件自重、配料以及确定堆放空间时，经常要用到材料的密度、表观密度和堆积密度等参数。常用建筑材料的有关参数见表 2-1。

2. 材料的密实度与孔隙率

1) 密实度

密实度是指材料体积内被固体物质所充实的程度，也就是固体物质的体积占总体积的比例。密实度反映了材料的致密程度，以 D 表示：

$$D=\frac{V}{V_0}\times 100\%=\frac{\rho_0}{\rho}\times 100\% \tag{2-5}$$

表 2-1 常用建筑材料的密度、表观密度、堆积密度和孔隙率

材　　料	密度 ρ /(g/cm^3)	表观密度 ρ_0 /(kg/m^3)	堆积密度 ρ_0' /(kg/m^3)	孔隙率(%)
石　灰　岩	2.60	1 800～2 600	—	—
花　岗　石	2.6～2.9	2 500～2 800	—	0.5～3.0
碎石(石灰岩)	2.60	—	1 400～1 700	—
砂	2.60	—	1 450～1 650	—
黏　　土	2.60	—	1 600～1 800	—
普通黏土砖	2.5～2.8	1 600～1 800	—	20～40
黏土空心砖	2.50	1 000～1 400	—	—
水　　泥	3.10	—	1 200～1 300	—
普通混凝土	—	2 100～2 600	—	5～20
轻骨料混凝土	—	800～1 900	—	—
木　　材	1.55	400～800	—	55～75
钢　　材	7.85	7 850	—	0
泡沫塑料	—	20～50	—	—
玻　　璃	2.55	—	—	—

含有孔隙的固体材料的密实度均小于 1。材料的很多性能(如强度、吸水性、耐久性、导热性等)均与其密实度有关。

2) 孔隙率

孔隙率是指在材料体积内孔隙总体积(V_P)占材料总体积(V_0)的百分率，以 P 表示。因 $V_P=V_0-V$，则 P 值可用下式计算：

$$P=\frac{V_0-V}{V_0}\times 100\%=\left(1-\frac{V}{V_0}\right)\times 100\%=\left(1-\frac{\rho_0}{\rho}\right)\times 100\% \tag{2-6}$$

孔隙率与密实度的关系为

$$P+D=1 \tag{2-7}$$

上式表明，材料的总体积是由该材料的固体物质与其所包含的孔隙所组成的。

3) 材料的孔隙

材料内部孔隙一般由自然形成或在生产、制造过程中产生，主要形成原因包括：材料内部混入水(如混凝土、砂浆、石膏制品)；自然冷却作用(如浮石、火山渣)；外加剂作用(如加气混凝土、泡沫塑料)；焙烧作用(如膨胀珍珠岩颗粒、烧结砖)等。

材料的孔隙构造特征对建筑材料的各种基本性质具有重要的影响，一般可由孔隙率、孔隙连通性和孔隙直径 3 个指标来描述。孔隙率的大小及孔隙本身的特征与材料的许多重要性质(如强度、吸水性、抗渗性、抗冻性和导热性等)都有密切关系。一般而言，孔隙率

较小且连通孔较少的材料，其吸水性较小、强度较高、抗渗性和抗冻性较好、绝热效果好。孔隙率是指孔隙在材料体积中所占的比例。孔隙按其连通性可分为连通孔、封闭孔和半连通孔(或半封闭孔)。连通孔是指孔隙之间、孔隙和外界之间都连通的孔隙(如木材、矿渣)；封闭孔是指孔隙之间、孔隙和外界之间都不连通的孔隙(如发泡聚苯乙烯、陶粒)；介于两者之间的称为半连通孔或半封闭孔。一般情况下，连通孔对材料的吸水性、吸声性影响较大，而封闭孔对材料的保温隔热性能影响较大。孔隙按其直径的大小可分为粗大孔、毛细孔、微孔。粗大孔是指直径大于毫米级的孔隙，这类孔隙对材料的密度、强度等性能影响较大，如矿渣。毛细孔是指直径在微米至毫米级的孔隙，对水具有强烈的毛细作用，主要影响材料的吸水性、抗冻性等性能，这类孔在多数材料内都存在，如混凝土、石膏等。微孔的直径在微米级以下，其直径微小，对材料的性能反而影响不大，如瓷质及炻质陶瓷。几种常用建筑材料的孔隙率见表 2-1。

3. 材料的填充率与空隙率

1) 填充率

填充率是指散粒材料在某容器的堆积体积中，被其颗粒填充的程度，以 D' 表示。可用下式计算：

$$D' = \frac{V_0}{V_0'} \times 100\% = \frac{\rho_0'}{\rho_0} \times 100\% \tag{2-8}$$

2) 空隙率

空隙率，是指散粒材料在某容器的堆积体积中，颗粒之间的空隙体积(V_a)占堆积体积的百分率，以 P' 表示。因 $V_a = V_0' - V_0$，则 P' 值可用下式计算：

$$P' = \frac{V_0' - V_0}{V_0'} \times 100\% = \left(1 - \frac{V_0}{V_0'}\right) \times 100\% = \left(1 - \frac{\rho_0'}{\rho_0}\right) \times 100\% = 1 - D' \tag{2-9}$$

即

$$D' + P' = 1 \tag{2-10}$$

空隙率反映了散粒材料颗粒之间的相互填充的致密程度，对于混凝土的粗、细骨料，空隙率越小，说明其颗粒大小搭配得越合理，用其配制的混凝土越密实，水泥也越节约。配制混凝土时，砂、石空隙率可作为控制混凝土骨料级配与计算含砂率的依据。

2.1.2 材料与水有关的性能

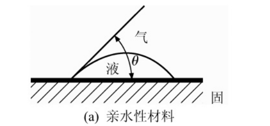
1. 亲水性与憎水性

材料在空气中与水接触时，根据其是否能被水润湿，可将材料分为亲水性和憎水性(或称疏水性)两大类。

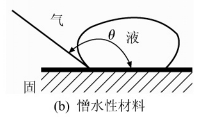
材料在空气中与水接触时能被水润湿的性质称为亲水性。具有这种性质的材料称为亲水性材料，如砖、混凝土、木材等。

材料在空气中与水接触时不能被水润湿的性质称为憎水性(也称疏水性)。具有这种性质的材料称为疏水性材料，如沥青、石蜡等。

在材料、水和空气 3 者交点处，沿水的表面且限于材料和水接触面所形成的夹角 θ 称为“润湿角”。当 $\theta \leqslant 90°$ 时材料分子与水分子之间互相的吸引力大于水分子之间的内聚力，称为亲水性材料，如图 2.3(a)所示；当 $\theta > 90°$，材料分子与水分子之间互相的吸引力小于水分子之间的内聚力，称为憎水性材料，如图 2.3(b)所示。



(a) 亲水性材料



(b) 憎水性材料

图 2.3　材料的润湿示意图

大多数建筑材料(如石料、砖及砌块、混凝土、木材等)都属于亲水性材料，其表面均能被水润湿，且能通过毛细管作用将水吸入材料的毛细管内部。沥青、石蜡等属于憎水性材料，其表面不能被水润湿，该类材料一般能阻止水分渗入毛细管中，因而能降低材料的吸水性。憎水性材料不仅可用作防水材料，而且还可用于亲水性材料的表面处理以降低其吸水性。

2. 吸水性

材料在浸水状态下吸入水分的能力称为吸水性。吸水性的大小，以吸水率表示。吸水率有质量吸水率和体积吸水率之分。

质量吸水率是指材料吸水饱和时，其所吸收水分的质量占材料干燥时质量的百分率，可按下式计算：

$$W_{质} = \frac{m_{湿} - m_{干}}{m_{干}} \times 100\% \tag{2-11}$$

式中　$W_{质}$——材料的质量吸水率(%)；

$m_{湿}$——材料吸水饱和后的质量(g)；

$m_{干}$——材料烘干到恒重的质量(g)。

体积吸水率是指材料体积内被水充实的程度，即材料吸水饱和时，所吸收水分的体积占干燥材料自然体积的百分率，可按下式计算：

$$W_{体} = \frac{V_{水}}{V_0} \times 100\% = \frac{m_{湿} - m_{干}}{V_0} \cdot \frac{1}{\rho_{H_2O}} \tag{2-12}$$

式中　$W_{体}$——材料的体积吸水率(%)；

$m_{水}$——材料在吸水饱和时水的体积(cm^3)；

V_0——干燥材料在自然状态下的体积(cm^3)；

ρ_{H_2O}——水的密度(g/cm^3)，在常温下 ρ_{H_2O} =1 g/cm^3。

质量吸水率与体积吸水率存在如下关系：

$$W_{体} = W_{质} \cdot \rho_0 \frac{1}{\rho_{H_2O}} = W_{质} \cdot \rho_0 \tag{2-13}$$

式中　ρ_0——材料干燥状态的表观密度(g/cm^3)。

材料吸水性不仅取决于材料本身是亲水的还是憎水的，还与其孔隙率的大小及孔隙特征有关。封闭的孔隙实际上是不吸水的，只有那些开口而尤以毛细管连通的孔才是吸水最强的。粗大开口的孔隙，水分又不易存留，难以吸足水分，故材料的体积吸水率常小于孔隙率，这类材料常用质量吸水率表示它的吸水性。而对于某些轻质材料，如加气混凝土、软木等，由于具有很多开口而微小的孔隙，所以它的质量吸水率往往超过 100%，即湿质量

为干质量的几倍，在这种情况下，最好用体积吸水率表示其吸水性。

材料在吸水后，原有的许多性能会发生改变，如强度降低、表观密度加大、保湿性变差，甚至有的材料会因吸水发生化学反应而变质。因此，吸水率大对材料性能是不利的。

3. 吸湿性

材料在潮湿的空气中吸收空气中水分的性质，称为吸湿性。吸湿性的大小用含水率表示。材料所含水的质量占材料干燥质量的百分数，称为材料的含水率，可按下式计算：

$$W_{含}=\frac{m_{含}-m_{干}}{m_{干}}\times 100\% \tag{2-14}$$

式中 $W_{含}$——材料的含水率(%)；

$m_{含}$——材料含水时的质量(g)；

$m_{干}$——材料干燥至恒重时的质量(g)。

材料的含水率大小除与材料本身的特性有关外，还与周围环境的温度、湿度有关。气温越低、相对湿度越大，材料的含水率也就越大。当材料吸水达到饱和状态时的含水率即为吸水率。

特别提示

材料随着空气湿度的变化，既能在空气中吸收水分，又可向外界扩散水分，最终将使材料中的水分与周围空气的湿度达到平衡，这时材料的含水率称为平衡含水率。平衡含水率并不是固定不变的，它随环境温度和湿度的变化而改变。

4. 耐水性

材料长期在饱和水作用下而不破坏，其强度也不显著降低的性质称为耐水性。材料的耐水性用软化系数表示，可按下式计算：

$$K_{软}=\frac{f_{饱}}{f_{干}} \tag{2-15}$$

式中 $K_{软}$——材料的软化系数；

$f_{饱}$——材料在水饱和状态下的抗压强度(MPa)；

$f_{干}$——材料在干燥状态下的抗压强度(MPa)。

材料的软化系数反映了材料吸水后强度降低的程度，其值在0～1之间。$K_{软}$越小，耐水性越差，故$K_{软}$值可作为处于严重受水侵蚀或潮湿环境下的重要结构物选择材料时的主要依据。处于水中的重要结构物，其材料的$K_{软}$值应不小于0.85～0.90；次要的或受潮较轻的结构物，其$K_{软}$值应不小于0.75～0.85；对于经常处于干燥环境的结构物，可不必考虑$K_{软}$。通常认为$K_{软}$大于0.80的材料是耐水材料。

5. 抗渗性

材料抵抗压力水渗透的性质称为抗渗性(或不透水性)，可用渗透系数K表示。

达西定律表明，在一定时间内，透过材料试件的水量与试件的断面积及水头差(液压)成正比，与试件的厚度成反比，即：

$$W=K\frac{h}{d}At \quad 或 \quad K=\frac{Wd}{Ath} \tag{2-16}$$

式中 K——渗透系数(cm/h)；

W——透过材料试件的水量(cm^3)；

t——透水时间(h)；

A——透水面积(cm^2)；

h——静水压力水头(cm)；

d——试件厚度(cm)。

渗透系数反映了材料抵抗压力水渗透的性质，渗透系数越大，材料的抗渗性越差。

建筑中大量使用的砂浆。混凝土等材料，其抗渗性用抗渗等级表示。抗渗等级用材料抵抗的最大水压力来表示，如 P6、P8、P10、P12 等，分别表示材料可抵抗 0.6MPa、0.8MPa、1.0MPa、1.2MPa 的水压力而不渗水。抗渗等级越大，材料的抗渗性越好。

材料抗渗性的好坏与材料的孔隙率和孔隙特征有密切关系。孔隙率很小而且是封闭孔隙的材料具有较高的抗渗性。对于地下建筑及水工构筑物，因常受到压力水的作用，故要求其材料具有一定的抗渗性；对于防水材料，则要求具有更高的抗渗性。材料抵抗其他液体渗透的性质，也属于抗渗性。

6. 抗冻性

材料在吸水饱和状态下，能经受多次冻结和融化作用(冻融循环)而不破坏，同时也不严重降低强度，质量也不显著减少的性质，称为抗冻性。一般建筑材料如混凝土抗冻性常用抗冻等级 F 表示。抗冻等级是以规定的试件在规定试验条件下，测得其强度降低不超过规定值，并无明显损坏和剥落时所能经受的冻融循环次数来确定的，用符号“F”加数字表示，其中数字为最大冻融循环次数。例如，抗冻等级 F10 表示在标准试验条件下，材料强度下降不大于 25%，质量损失不大于 5%，所能经受的冻融循环的次数最多为 10 次。

材料经多次冻融循环后，表面将出现裂纹、剥落等现象，造成质量损失、强度降低。这是由于材料内部孔隙中的水分结冰时体积增大，对孔壁产生很大压力，冰融化时压力又骤然消失所致。无论是冻结还是融化过程都会使材料冻融交界层间产生明显的压力差，并作用于孔壁使之遭损。对于冬季室外计算温度低于−10℃的地区，工程中使用的材料必须进行抗冻试验。

材料抗冻等级的选择是根据建筑物的种类、材料的使用条件和部位、当地的气候条件等因素决定的。例如烧结普通砖、陶瓷面砖、轻混凝土等墙体材料，一般要求抗冻等级材料经多次冻融交替作用后，表面将出现剥落、裂纹，产生质量损失，强度也将会降低。冰冻对材料的破坏作用，是由于材料孔隙内的水结冰时体积膨胀(约增大 9%)而引起孔壁受力破裂所致。所以，材料抗冻性的高低，决定于材料的吸水饱和程度和材料对结冰时体积膨胀所产生的压力的抵抗能力。

抗冻性良好的材料，对于抵抗温度变化、干湿交替等破坏作用的性能也较强。所以，抗冻性常作为考查材料耐久性的一个指标。处于温暖地区的建筑物，虽无冰冻作用，但为抵抗大气的作用，确保建筑物的耐久性，有时对材料也提出一定的抗冻性要求。

2.1.3 材料的热工性能

在建筑中，建筑材料除了须满足必要的强度及其他性能要求外，为了节约建筑物的使

用能耗以及为生产和生活创造适宜的条件，常要求材料具有一定的热性质以维持室内温度。常考虑的热性质有材料的导热性、热容量、保湿隔热性能和热变形性等。

1. 导热性

材料传导热量的能力称为导热性。材料导热能力的大小可用导热系数(λ)表示。导热系数在数值上等于厚度为1m的材料，当其相对两侧表面的温度差为1K时，经单位面积($1m^2$)单位时间(1s)所通过的热量，可用下式表示：

$$\lambda = \frac{Q\delta}{At(T_2 - T_1)} \tag{2-17}$$

式中 λ——导热系数[W/(m·K)]；

Q——传导的热量(J)；

A——热传导面积(m^2)；

δ——材料厚度(m)；

t——热传导时间(s)；

$T_2 - T_1$——材料两侧温差(K)。

材料的导热系数越小，绝热性能越好。各种建筑材料的导热系数差别很大，大致在0.035～3.5 W/(m·K)之间。典型材料导热系数见表2-2。

材料的导热系数大小与内部孔隙率、孔隙特征、温度、湿度、热流方向等因素有关。材料的导热系数与其内部孔隙率和孔隙特征构造有密切关系。由于密闭空气的导热系数很小，仅0.023W/(m·K)，所以，一般情况下孔隙率越大，密度越低，导热系数越小。当孔隙率相同时，由于孔隙中空气对流的作用，孔隙相互连通比封闭而不连通的导热系数要高；孔隙尺寸越大，导热系数越大。由于温度升高时材料固体分子热运动增强，同时材料孔隙中空气的导热和孔壁间的辐射作用也有所增强，因此，一般来说，材料的导热系数随着材料温度的升高而增大。材料受潮或受冻后，其导热系数会大大提高，这是由于水和冰的导热系数比空气的导热系数高很多，分别为0.58W/(m·K)和2.20W/(m·K)。因此，绝热材料应经常处于干燥状态，以利于发挥材料的绝热性能。对于各向异性的材料来说，不同方向的导热性能也有区别。例如木材，热流与纤维延伸方向平行时，其所受到的阻力小；而热流垂直于纤维延伸方向时，其所受到的阻力大。也就是说，顺着纤维方向的导热性比垂直纤维方向的导热性大。

2. 热容量

材料加热时吸收热量、冷却时放出热量的性质称为热容量。热容量大小用比热容(也称热容量系数，简称比热)表示。比热容表示1g材料，温度升高1K时所吸收的热量，或降低1K时放出的热量。材料吸收或放出的热量和比热可由下式计算：

$$Q = cm(T_2 - T_1) \tag{2-18}$$

$$c = \frac{Q}{m(T_2 - T_1)} \tag{2-19}$$

式中 Q——材料吸收或放出的热量(J)；

c——材料的比热[J/(g·K)]；

m——材料的质量(g)；

$T_2 - T_1$——材料受热或冷却前后的温差(K)。

比热是反映材料的吸热或放热能力大小的物理量。不同材料的比热不同，即使是同一种材料，由于所处物态不同，其比热也不同。例如，水的比热为4.186J/(g·K)，而结冰后比热则是2.093J/(g·K)。c与m的乘积，即$c \cdot m$为材料的热容量值。采用热容量大的材料，对于保持室内温度具有很大意义。如果采用热容量大的材料做维护结构材料，能在热流变动或采暖设备供热不均匀时缓和室内的温度波动，不会使人有忽冷忽热的感觉。常用建筑材料的比热见表2-2。

表2-2　常用建筑材料及物质的热工性质

材料名称	钢　材	混凝土	松　木	烧结普通砖	花岗石	密闭空气	水
比热/[J/(g·K)]	0.48	0.84	2.72	0.88	0.92	1.00	4.18
导热系数/[W/(m·K)]	58	1.51	1.17～0.35	0.80	3.49	0.023	0.58

3. 材料的保温隔热性能

在建筑工程中常把$1/\lambda$称为材料的热阻，用R表示，单位为(m·K)/W。导热系数λ和热阻R都是评定建筑材料保温隔热性能的重要指标。人们常习惯把防止室内热量的散失称为保温，把防止外部热量的进入称为隔热，将保温隔热统称为绝热。

材料的导热系数越小，其热阻值越大，则材料的导热性能越差，其保温隔热性能越好，所以常将$\lambda \leqslant 0.175$W/(m·K)的材料称为绝热材料。

4. 热变形性

材料的热变形性是指材料在温度变化时其尺寸的变化，一般材料均具有热胀冷缩这一自然属性。材料的热变形性，常用长度方向变化的线膨胀系数表示，土木工程总体上要求材料的热变形不要太大，对于像金属、塑料等热膨胀系数大的材料，因温度和日照都易引起伸缩，成为构件产生位移的原因，在构件接合和组合时都必须予以注意。在有隔热保温要求的工程设计时，应尽量选用热容量(或比热)大、导热系数小的材料。

2.1.4 材料的声学性能

1. 材料的吸声性能

物体振动时，迫使邻近空气随着振动而形成声波，当声波接触到材料表面时，一部分被反射，一部分穿透材料，而其余部分则在材料内部的孔隙中引起空气分子与孔壁的摩擦和黏滞阻力，使相当一部分声能转化为热能而被吸收。被材料吸收的声能(包括穿透材料的声能在内)与原先传递给材料的全部声能之比，是评定材料吸声性能好坏的主要指标，称为吸声系数，用下式表示：

$$\alpha = \frac{E_0}{E} \tag{2-20}$$

式中　α——材料的吸声系数；

E——传递给材料的全部入射声能；

E_0——被材料吸收(包括透过)的声能。

假如入射声能的70%被吸收，30%被反射，则该材料的吸声系数α就等于0.7。当入射

声能100%被吸收而无反射时，吸声系数等于1。一般材料的吸声系数在0～1之间，吸声系数越大，则吸声效果越好。只有悬挂的空间吸声体，由于有效吸声面积大于计算面积，可获得吸声系数大于1的情况。

特别提示

为了全面反映材料的吸声性能，规定取125Hz、250Hz、500Hz、1 000Hz、2 000Hz、4 000Hz等6个频率的吸声系数来表示材料的特定吸声频率，则这6个频率的平均吸声系数大于0.2的材料，可称为吸声材料。

吸声材料能抑制噪声和减弱声波的反射作用。为了改善声波在室内传播的质量，保持良好的音响效果和减少噪声的危害，在进行音乐厅、电影院、大会堂、播音室等内部装饰时，应使用适当的吸声材料，在噪声大的厂房内有时也采用吸声材料。一般来讲，对同一种多孔材料，表观密度增大时(即空隙率减小时)，对低频声波的吸声效果有所提高，而对高频吸声效果则有所降低。增加多孔材料的厚度，可提高对低频声波的吸声效果，而对高频声波则没有多大影响。材料内部孔隙越多、越细小，吸声效果越好。如果孔隙太大，则效果较差；如果材料总的孔隙大部分为单独的封闭气泡(如聚氯乙烯泡沫塑料)，则因声波不能进入，从吸声机理上来讲，就不属多孔性吸声材料。当多孔材料表面涂刷油漆或材料吸湿时，则因材料表面的孔隙被水分或涂料所堵塞，使其吸声效果大大降低。

2. 材料的隔声性能

材料能减弱或隔断声波传递的性能称为隔声性能。人们要隔绝的声音按其传播途径有空气声(通过空气传播的声音)和固体声(通过固体的撞击或振动传播的声音)两种，两者隔声的原理不同。

对空气声的隔绝主要是依据声学中的“质量定律”，即材料的密度越大，越不易受声波作用而产生振动，因此，其声波通过材料传递的速度迅速减弱，其隔声效果越好，所以，应选用密度大的材料(如钢筋混凝土、实心砖等)作为隔绝空气声的材料。对固体声隔绝的最有效措施是断绝其声波继续传递的途径，即在产生和传递固体声波的结构(如梁、框架与楼板、隔墙以及它们的交接处等)层中加入具有一定弹性的衬垫材料，以阻止或减弱固体声波的继续传播。

结构的隔声性能用隔声量表示，隔声量是指入射与透过材料声能相差的分贝(dB)数。隔声量越大，隔声性能越好。



中国国家大剧院的建筑声学创新应用

国家大剧院位于北京人民大会堂西侧，总建筑面积16万m^2。主体建筑由外部围护钢结构壳体和内部2 416座的歌剧院、2 017座的音乐厅、1 040座的戏剧院、公共大厅及配套用房组成。外部围护钢结构壳体呈半椭球形，东西长210m，南北长140m，高46m，地下部分深32.5m。椭球形屋面主要采用钛金属板饰面，中部为渐开式玻璃幕墙。椭球壳体外环绕人工湖，入口和通道设在水面下，如图2.4所示。



图 2.4　中国国家大剧院

中国国家大剧院造型新颖、前卫，构思独特，是目前世界上最大的穹顶。国家大剧院不但建筑形式、建筑结构、建筑设备等方面新颖独特，在建筑声学上也有很多创新应用。国家大剧院的建筑声学主设计为法国 CSTB 研究所，清华大学建筑学院作为国内声学配合单位，协助 CSTB 完成深化设计、理论计算、实验研究等工作。主要创新点体现如下。

(1) “蛋壳”底层喷涂纤维素防止雨噪声。

国家大剧院的 3.6 万 m^2 “蛋壳”屋盖非常巨大，为减轻结构荷载，采用了钛金属装饰面轻型屋盖。但是存在的一个问题是：降雨时，室内会受到雨点撞击金属屋面所产生的雨噪声干扰。在设计时，创造性地提出在屋盖底层采用纤维素喷涂防止雨噪声的方案，并最终得到了应用实施。即在屋盖板下，喷涂一层 25mm 厚的 K-13 纤维素喷涂吸声材料。

(2) 戏剧院的 MLS 声扩散墙面。

戏剧院观众厅墙面采用了 MLS 设计的声扩散墙面，看上去像凸凹起伏的、不规则排列的竖条，目的是扩散声音，可保证室内声场的均匀性，使声音更美妙动听。MLS 称为最大长度序列，是一种数论算法，其扩散声音的原理是，声波到达墙面的某个凹凸槽后，一部分入射到深槽内产生反射，另一部在槽表面产生反射，两者接触界面的时间有先后，反射声会出现相位不同，叠加在一起成为局部非定向反射，大量不规则排列的凹凸槽整体上形成了声音的扩散反射。

(3) 音乐厅 GRC 声扩散装饰板。

中国国家大剧院的音乐厅的顶棚和墙面采用了平均厚度达到 4cm 的 GRC(增强纤维水泥成型板)。顶棚上的 GRC 装饰有看似凌乱的沟槽，侧墙 GRC 为起伏的表面，目的在于扩散反射声音。平面反射的声音类似于镜子，会因局部声音强烈反射影响音质，扩散反射类似于被磨毛的乌玻璃，声音反射更加均匀、柔和。另外，厚重的 GRC 板能够有效地防止低频吸收，增强厅内的低频混响时间，使低音效果(如管风琴、大管、大提琴等)更加具有震撼力和感染力。

(4) 歌剧院金属透声装饰网。

长久以来，剧院的体型问题使设计师苦恼。长方的体型有利于反射声音，音质最好，但视觉效果太古板，而椭圆的体型会使声音聚焦，音质不好，但有曲线的优美视觉效果。中国国家大剧院的歌剧院墙面上使用了一种透声装饰网，完美地解决室内视觉效果和听觉效果之间的矛盾问题。这是一种金色网子，看上去像优美的墙，但可以透过声音。网是弧形的，声音透过去后的墙是长方形的，这样就使视觉为弧形，而听觉为长方形，一举两得。这种应用于歌剧院的网的设计在世界上是第一次。

(5) 歌剧院木装饰板顶棚的混凝土覆层。

歌剧院的顶棚是实木板拼接装饰顶棚，配合大型的椭圆形灯带，在侧墙金色网的辉映下，显得金碧辉煌，古典而别致。为了防止顶棚因木板产生的不良低频吸收，以顶棚为模板，在其上密质地浇灌了一层4cm厚度的混凝土，增加了重量，提高了低频反射效果。

(6) 舒适的观众厅声学软座椅。

中国国家大剧院的软座椅，采用了人体工程学设计，外形优美，安坐舒适。而且，软座椅还具有重要的吸声作用。观众厅内大量的观众所形成的吸声量是不容忽视的，为了控制室内吸声，座椅吸声系数必须符合设计要求，座椅的聚氨酯内填料、织物面料、软垫的面积、软垫的厚度等都经过了严格的设计，一方面达到了观众厅吸声的设计要求，另一方面坐人时和不坐人时具有相同的吸声系数，保证观众厅的室内在空场、满场、部分上座率等不同观众人数时具有基本一致的室内声学效果。

(7) Z型轻钢减振龙骨轻质隔声墙。

为了保证国家大剧院的录音室、演播室、琴房等轻质隔墙的隔声性能，采用了一种特殊结构的Z型轻钢减振龙骨，用于安装石膏板隔墙。Z型轻钢减振龙骨比常规的C型轻钢龙骨更有弹性，隔声性能更好，尤其在难于隔绝的低频部分隔声优势更大。

(以上内容参考燕翔、周庆琳发表于《建筑学报》2008年第2期的论文《国家大剧院建筑声学的创新应用》。)

2.2 材料的力学性能

材料的力学性能主要是指材料在外力(荷载)作用下，有关抵抗破坏和变形能力的性质。

2.2.1 材料的强度、强度等级和比强度

1. 强度

材料可抵抗因外力(荷载)作用而引起破坏的最大能力，即为该材料的强度。其值是以材料受力破坏时单位受力面积上所承受的力表示的，其通式可写为

$$f = P/A \tag{2-21}$$

式中 f——材料的强度(MPa)；

P——破坏荷载(N)；

A——受荷面积(mm^2)。

材料在建筑物上所受的外力主要有拉力、压力、弯曲及剪力等。材料抵抗这些外力破坏的能力，分别称为抗拉、抗压、抗弯和抗剪强度等。这些强度一般是通过静力试验来测定的，因而总称为静力强度。如图2.5所示材料基本强度的分类和测定。

材料抗拉、抗压和抗剪等强度按公式2-21计算；抗弯(折)强度的计算，按受力情况、截面形状等不同，方法各异。如当跨中受一集中荷载的矩形截面的试件，如图2.5所示，其抗弯强度按下式计算：

$$f_m = \frac{3PL}{2bh^2} \tag{2-22}$$

式中 f_m——抗弯(折)强度(MPa)；

P——受弯时破坏荷载(N)；
L——两支点间的距离(mm)；
b——材料截面宽度(mm)；
h——材料截面高度(mm)。

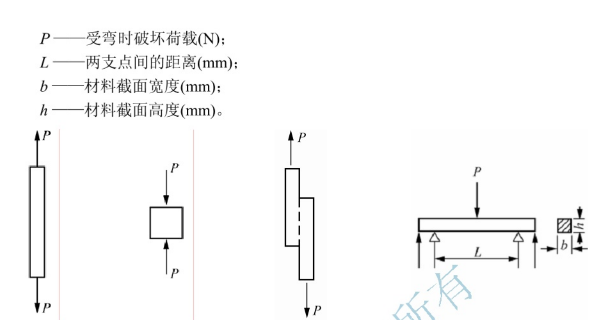


图 2.5 材料静力强度分类和测定

材料的静力强度实际上只是在特定条件下测定的强度值。试验测出的强度值，除受材料的组成、结构等内在因素的影响外，还与试验条件有密切关系，如试件的形状、尺寸、表面状态、含水率、温度及试验时加荷速度等。为了使试验结果比较准确而且具有互相比较的意义，测定材料强度时必须严格按照统一的标准试验方法进行。

2. 强度等级

大部分建筑材料，根据其极限强度的大小，可划分为若干不同的强度等级。如建筑砂浆按抗压强度分为 M20、M15、M10、M7.5、M5.0、M2.5 这 6 个强度等级，普通硅酸盐水泥按抗压强度分为 42.5、42.5R、52.5、52.5R 等 2 个强度等级 4 个类型。将建筑材料划分为若干强度等级，对掌握材料性能。合理选用材料、正确进行设计和控制工程质量都十分重要。

3. 比强度

对不同的材料强度进行比较，可以采用比强度。比强度是按单位质量计算的材料强度，其值等于材料的强度与其表观密度之比，它是衡量材料轻质高强的一个主要指标，优质结构材料的比强度应高。几种典型材料的强度比较，见表 2-3。

表 2-3 几种典型材料的强度比较

材　料	体积密度/(kg/m^3)	强度/MPa	比强度
低碳钢(抗拉)	7 850	400	0.051
普通混凝土(抗压)	1 400	40	0.017
松木(顺纹抗拉)	500	100	0.200
玻璃钢(抗压)	2 000	450	0.225
烧结普通砖(抗压)	1 700	10	0.005

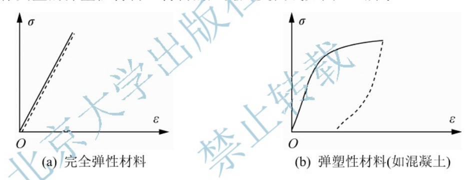
由表 2-3 数据可知，玻璃钢是轻质高强的高效能材料，而普通混凝土为质量大而强度较低的材料。

2.2.2 材料的弹性和塑性

材料在外力作用下产生变形，当外力取消后，材料变形即可消失并能完全恢复原来形状的性质，称为弹性。这种当外力取消后瞬间内即可完全消失的变形，称为弹性变形。这种变形属于可逆变形，其数值的大小与外力成正比；其比例系数 E 称为弹性模量。在弹性变形范围内，弹性模量 E 为常数，其值等于应力与应变的比值，弹性模量是衡量材料抵抗变形能力的一个指标，E 越大，材料越不易变形。

在外力作用下材料产生变形，如果取消外力后，仍保持变形后的形状尺寸并且不产生裂缝的性质，称为塑性。这种不能消失的变形，称为塑性变形(或永久变形)。

许多材料受力不大时，仅产生弹性变形；受力超过一定限度后，即产生塑性变形。如建筑钢材，当外力值小于弹性极限时，仅产生弹性变形；当外力大于弹性极限后，则除了弹性变形外，还产生塑性变形。有的材料在受力时，弹性变形和塑性变形同时产生，如果取消外力，则弹性变形可以消失而其塑性变形则不能消失，称为弹塑性材料，普通混凝土硬化后可看作典型的弹塑性材料。材料的应力应变曲线如图 2.6 所示。



(a) 完全弹性材料　　(b) 弹塑性材料(如混凝土)

图 2.6 材料的应力应变曲线

2.2.3 材料的脆性和韧性

在外力作用下，当外力达到一定限度后，材料突然破坏而又无明显的塑性变形的性质，称为脆性。脆性材料抵抗冲击荷载或震动作用的能力很差，其抗压强度比抗拉强度高得多，如混凝土、玻璃、砖、石、陶瓷等。

在冲击、振动荷载作用下，材料能吸收较大的能量，产生一定的变形而不致被破坏的性能，称为韧性。如建筑钢材、木材等属于韧性较好的材料。建筑工程中，对于要承受冲击荷载和有抗震要求的结构，其所用的材料都要考虑材料的冲击韧性。

2.2.4 材料的硬度和耐磨性

硬度是材料表面能抵抗其他较硬物体压入或刻画的能力。不同材料的硬度测定方法不同。按刻画法，矿物硬度分为 10 级(莫氏硬度)。其硬度递增的顺序依次为：滑石、石膏、方解石、萤石、磷灰石、正长石、石英、黄玉、刚玉、金刚石。木材、混凝土、钢材等的硬度常用钢球压入法测定(布氏硬度 HB)。

一般来说，硬度大的材料耐磨性较强，但不易加工。

耐磨性是材料表面抵抗磨损的能力。建筑工程中，用于道路、地面、踏步等部位的材料，均应考虑其硬度和耐磨性。一般来说，强度较高且密实的材料，其硬度较大、耐磨性较好。

2.3 材料的耐久性

建筑材料除应满足各项物理、力学的功能要求外，还必须经久耐用，反映这一要求的性质称为耐久性。耐久性是指材料在内部和外部多种因素作用下，长久地保持其使用性能的性质。

影响材料耐久性的因素是多种多样的，除材料内在原因使其组成、构造、性能发生变化以外，还要长期受到使用条件及各种自然因素的作用，这些作用可概括为以下几方面。

(1) 物理作用。包括环境温度、湿度的交替变化，即冷热、干湿、冻融等循环作用。材料在经受这些作用后，将发生膨胀、收缩或产生内应力，长期的反复作用将使材料变形、开裂甚至破坏。

(2) 化学作用。包括大气和环境水中的酸、碱、盐或其他有害物质对材料的侵蚀作用，以及日光、紫外线等对材料的作用，使材料发生腐蚀、碳化、老化等而逐渐丧失使用功能。

(3) 机械作用。包括荷载的持续作用，交变荷载对材料引起的疲劳、冲击、磨损等。

(4) 生物作用。包括菌类、昆虫等的侵害作用，导致材料发生腐朽、虫蛀等而破坏。

一般矿物质材料如石材、砖瓦、陶瓷、混凝土等，暴露在大气中时，主要受到大气的物理作用；当材料处于水位变化区或水中时，还受到环境水的化学侵蚀作用。金属材料在大气中易被锈蚀；沥青及高分子材料在阳光、空气及辐射的作用下，会逐渐老化、变质而破坏。影响材料耐久性的外部因素往往通过其内部因素而发生作用，与材料耐久性有关的内部因素主要是材料的化学组成、结构和构造的特点。当材料含有易与其他外部介质发生化学反应的成分时，就会造成因其抗渗性和耐腐蚀能力差而引起破坏。

对材料耐久性最可靠的判断，是对其在使用条件下进行长期的观察和测定，但这需要很长的时间，往往满足不了工程的需要。所以常常根据使用要求，用一些实验室可测定又能基本反映其耐久性特性的短时试验指标来表达。如：常用软化系数来反映材料的耐水性；用实验室的冻融循环(数小时一次)试验得出的抗冻等级来反映材料的抗冻性；采用较短时间的化学介质浸渍来反映实际环境中的水泥石长期腐蚀现象等。

为了提高材料的耐久性，以利于延长建筑物的使用寿命和减少维修费用，可根据使用情况和材料特点，采取相应的措施。如设法减轻大气或周围介质对材料的破坏作用(如降低湿度、排除侵蚀性物质等)，提高材料本身对外界作用的抵抗能力(如提高材料的密实度、采取防腐措施等)，也可用其他材料保护主体材料免受破坏(如覆面、抹灰、刷涂料等)。

本任务小结

本任务是学习建筑材料课程应首先具备的基础知识和理论，也是全书的重点内容之一。掌握和了解这些性质对于认识、研究和应用建筑材料具有极为重要的意义。

材料的物理性质包括材料与质量有关的性质、与水有关的性质、与热有关的性质、声学性质这4部分。与质量有关的性质：根据材料不同的状态可，分为密度、表观密度、体积密度、堆积密度，孔隙率、孔隙的构造特征和空隙率能描绘材料在不同状态下的疏密程度，它们都是影响材料工程性质的内在因素；与水有关的性质：亲水性和憎水性、吸水性与吸湿性、耐水性、抗渗性和抗冻性，这些性质都与材料的构造有着密切的联系；与热有关的性质：导热性、比热容、热容量、保温隔热性和热变形性等；材料的声学性能与其自身结构和构造特征关系密切。

材料的力学性质：主要包括材料在外力作用下产生变形和抵抗破坏的能力。材料在不同形式的外力作用下，抵抗外力的能力分别为抗拉、抗压、抗弯与抗剪强度等。不同的材料以不同的强度值划分强度等级。材料受力后的变形可分为弹性变形和塑性变形。按材料破坏前的变形情况，可将材料分为脆性材料与韧性材料，以分别适用于不同的使用条件。

材料的耐久性是一项综合指标，实际工程中多以能基本反映其耐久性特性的短时试验指标来评价。



习题

一、选择题

1．当材料的润湿角θ(　　)时，称为憎水性材料。

A．＞90°　　B．≤90°　　C．=0°　　D．＞135°

2．当材料的软化系数(　　)时，可以认为是耐水材料。

A．＞0.85　　B．＞0.8°　　C．＞0.75　　D．＞0.7

3．对于同一材料，各种密度参数的大小排列为(　　)。

A．密度＞堆积密度＞体积密度　　B．密度＞体积密度＞堆积密度

C．堆积密度＞密度＞体积密度　　D．体积密度＞堆积密度＞密度

4．含水率为5%的湿砂220g，其干燥后的重量是(　　)g。

A．209.35　　B．210.12　　C．209.52　　D．205.48

5．选择承受动荷载作用的结构材料时，要选择下述哪一类材料？(　　)

A．具有良好塑性的材料　　B．具有良好韧性的材料

C．具有良好弹性的材料　　D．具有良好硬度的材料

二、简答题

1．什么是材料的实际密度、体积密度和堆积密度？它们有何不同之处？

2．建筑材料的亲水性和憎水性在建筑工程中有什么实际意义？

3．什么是材料的吸水性、吸湿性、耐水性、抗渗性和抗冻性？各用什么指标表示？

4．材料的孔隙率与孔隙特征对材料的表观密度、吸水、吸湿、抗渗、抗冻、强度及保温隔热等性能有何影响？

5．弹性材料与塑性材料有何不同？材料的脆性与韧性有何不同？

6．为什么新建房屋的保暖性能较差？

三、计算题

1．某一块状材料的全干质量为115g，自然状态体积为44cm^3，绝对密实状态下的体积为37cm^3，试计算其实际密度、表观密度、密实度和孔隙率。

2．已知某种普通烧结砖的密度为2.5g/cm^3，表观密度为1 800kg/m^3，试计算该砖的孔隙率和密实度？

3．某种石子经完全干燥后，其质量为 482g，将其放入盛有水的量筒中吸水饱和后，水面由原来的452cm^{3}上升至630cm^3，取出石子擦干表面水后称质量为487g。试求该石子的表观密度、体积密度及吸水率。

4．计算下列材料的强度值。

(1) 边长为10cm的混凝土正立方体试块，抗压破坏荷载为265kN。

(2) 直径为10mm的钢材拉伸试件，破坏时的拉力为25kN。

学习任务3

胶凝材料

学习目标

通过本章的学习，使学生具备几种常用胶凝材料的使用与检测能力。具体内容包括：掌握胶凝材料的定义和分类；石灰、石膏及水玻璃的原料与生产；水泥熟化、凝结与硬化、技术要求、性质及应用等。

学习要求

能力目标	知识要点	权重
掌握石灰的种类、特性与应用	石灰的熟化和硬化特点、性质及应用	20%
掌握建筑石膏的种类、特性与应用	建筑石膏的硬化特点、性质及应用	10%
了解水玻璃的特性与应用	水玻璃的性质及主要应用	5%
了解通用硅酸盐水泥的生产原理及熟料矿物组成特点	水泥的生产原理、熟料矿物组成及水化特点	5%
了解水泥熟料水化机理及特点	熟料水化机理、影响因素	10%
掌握通用硅酸盐水泥的技术性质、特点及适用范围	通用硅酸盐水泥技术性质、检测要求及适用范围	40%
了解水泥石腐蚀的种类及防止措施	水泥石腐蚀的典型种类及防止措施	5%
了解典型专用及特性水泥的性能特点及应用	典型专用水泥及特性水泥的特点及应用	5%

任务导读

胶凝材料又称胶结料，是指在物理、化学作用下，能从浆体变成坚固的石状体，并能胶结其他物料，制成有一定机械强度的复合固体的物质。根据化学组成的不同，胶凝材料可分为无机与有机两大类：石灰、石膏、水泥等工地上俗称为“灰”的建筑材料属于无机胶凝材料；而沥青、天然或合成树脂等属于有机胶凝材料。无机胶凝材料按其硬化条件的不同又可分为气硬性和水硬性两类。水硬性胶凝材料和水成浆后，既能在空气中硬化又能在水中硬化，保持和继续发展其强度，这类材料通称为水泥，如硅酸盐水泥、铝酸盐水泥、硫铝酸盐水泥等。气硬性胶凝材料只能在空气中硬化，也只能在空气中保持和发展其强度，如石灰、石膏和水玻璃等，气硬性胶凝材料一般只适用于干燥环境中，而不宜用于潮湿环境中，更不可用于水中。

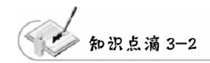


胶凝材料的发展

胶凝材料的发展有着极为悠久的历史。新石器时代，由于石器工具的进步，掘穴建室的建筑活动已经兴起。人类最早使用胶凝材料——黏土来抹砌简易的建筑物。在黏土中拌以植物纤维(稻草、壳皮)可以起到加筋增强作用，但是黏土的强度很低，遇水自行散解，不能抵抗雨水的侵蚀。随着火的发现，煅烧所得的石膏和石灰被用来调制建筑砂浆。公元初，古希腊人和古罗马人发现在石灰中掺入某些火山灰沉积物，不仅能提高强度，而且能防御水的侵蚀。到 10 世纪后半期，先后出现了用黏土质石灰石经煅烧后制成的水硬性石灰和罗马水泥，并在此基础上发展到用天然泥灰岩(黏土含量在 20%～25%的石灰石)煅烧、磨细制成的天然水泥。19 世纪初期，用人工配料，再经煅烧、磨细，以制造水硬性凝胶材料的方法，已经开始组织生产。英国阿斯普丁于 1824 年首先取得了该项产品的专利权。他将石灰石粉碎后煅烧，将所得石灰与黏土混合在类似烧石灰的窑中煅烧，将煅烧所得混合物磨成细粉，再用来制造水泥和人工石。因为这种胶凝材料结硬后的外观颜色和抗水性与当时建筑上常用的英国波特兰地区生产的石灰石相似，故称之为波特兰水泥。由于波特兰水泥含有较多的具有水化活性的碳酸钙，使其不但能在水中硬化而且能够长期抗水，强度甚高。其首批大规模使用的实例是 1825—1843 年修建的泰晤士河道工程。

大多数的早期水泥厂都设在英国的泰晤士河和半得威河附近。后来水泥生产遍及全世界，应用日益普遍。随着现代工业的发展，到 20 世纪初期，就逐渐出现了各种不同用途的硅酸盐水泥，如快硬水泥、抗硫酸盐水泥、大坝水泥以及油井水泥等，同期还发明了高铝水泥。近 30 年来，又陆续出现了硫铝酸盐水泥、氟铝酸盐水泥等品种，从而使水硬性胶凝材料，又进一步发展成更多类别。





中国建筑胶凝材料的发展

中国建筑胶凝材料的发展有着自己的一个很长的历史过程。

(1) 白灰面。早在公元前 5000—前 3000 年的新石器时代的仰韶文化时期，就有人用“白灰面”涂抹山洞、地穴的地面和四壁，使其变得光滑和坚硬。“白灰面”因呈白色粉末状而得名，它由天然姜石磨细而成。姜石是一种含二氧化硅较高的石灰石块，常夹在黄土中，是黄土中的钙质结核。“白灰面”是至今被发现的中国古代最早的建筑胶凝材料。

(2) 黄泥浆。公元前 16 世纪的商代，地穴建筑迅速向木结构建筑发展，此时除继续用“白灰面”抹地以外，开始采用黄泥浆砌筑土坯墙。在公元前 403—前 221 年的战国时代，出现了用草拌黄泥浆筑墙，还用它在土墙上衬砌墙面砖。在中国建筑史上，“白灰面”很早就被淘汰了，而黄泥浆和草拌黄泥浆作为胶凝材料则一直沿用到近代社会。

(3) 石灰。公元前 7 世纪的周朝出现了石灰，周朝的石灰是用大蛤的外壳烧制而成的。蛤壳主要成分是碳酸钙，将它煅烧到碳酸气全部逸出即成石灰。《左传》中有记载：“成公二年(公元前 635 年)八月宋文公卒，始厚葬用蜃灰。”蜃灰就是用蛤壳烧制而成的石灰材料，在周朝就已发现它具有良好的吸湿防潮性能和胶凝性能。在崇尚厚葬的古代，在墓葬中将蜃灰作为胶凝材料来修筑陵墓等。在明代《天工开物》一书中有“烧砺房法的图示”，这说明蜃灰的生产和使用自周朝开始到明代仍未失传，在中国历史上流传了很长的时间。到秦汉时代，除木结构建筑外，砖石结构建筑占重要地位。砖石结构需要用优良性能的胶凝材料进行砌筑，这就促使石灰制造业迅速发展，人们纷纷采用各地都能采集到的石灰石烧制石灰，石灰生产点应运而生。那时，石灰的使用方法是先将石灰与水混合制成石灰浆体，然后用浆体砌筑条石、砖墙和砖石拱券以及粉刷墙面。在汉代，石灰的应用已很普遍，采用石灰砌筑的砖石结构能建造多层楼阁。中国的万里长城修筑于公元前 7 世纪至公元 17 世纪，先后有 20 多个朝代主持或参与建造。秦、汉、明 3 个朝代修筑最长，在总长 5 万千米的长城中修筑了 5 000 多千米。在这 3 个朝代，石灰胶凝材料已经发展到较高水平，大量用于修建长城。所以，后人发现长城的许多地段是用石灰砌筑而成的。明代《天工开物》一书中，详细记载了石灰的生产方法，清代《营造法原》一书中，则记载了石灰烧制工艺与石灰性能之间的关系。这些记载说明我国到明、清时代已积累了较为丰富的石灰生产和使用经验。

(4) 三合土。在公元 5 世纪的中国南北朝时期，出现了一种名叫“三合土”的建筑材料，它由石灰、黏土和细砂组成。到明代，有了由石灰、陶粉和碎石组成的“三合土”。在清代，除石灰、黏土和细砂组成的“三合土”外，还有石灰、炉渣和沙子组成的“三合土”。清代《官式石桥做法》一书中对“三合土”的配备做了说明：“灰土即石灰与黄土之混合，或谓三合土”；“灰土按四六掺和，石灰四成，黄土六成”。以现代人眼光看，“三合土”也就是以石灰与黄土或其他火山灰质材料作为胶凝材料，以细砂、碎石和炉渣作为填料的混凝土。“三合土”与罗马的三组分砂浆，即“罗马砂浆”有许多类似之处。“三合土”自问世后，一般用作地面、屋面、房基和地面垫层。“三合土”经夯实后不仅具有较高的强度，还有较好的防水性，在清代还将它用于夯筑水坝。在欧洲大陆采用“罗马砂浆”的时候，遥远的东方古国中国，也在采用类似“罗马砂浆”的“三合土”，这是一个很有趣的历史巧合。

(5) 石灰掺有机物的胶凝材料。中国古代建筑胶凝材料发展中一个鲜明的特点是采用石灰

掺有机物的胶凝材料，如“石灰—糯米”、“石灰—桐油”、“石灰—血料”、“石灰—白芨”以及“石灰—糯米—明矾”等。另外，在使用“三合土”时，掺入糯米和血料等有机物。据民间传说，秦代修筑长城中，采用糯米汁砌筑砖石。考古发现，南北朝时期的河南邓县的画像砖墙是用含有淀粉的胶凝材料衬砌的；河南登封县的少林寺，北宋宣和二年、明代弘治十二年和嘉靖四十年等不同时代的塔，在建造时都采用了掺有淀粉的石灰作胶凝材料。《宋会要》记载，公元1170年南宋乾道六年修筑和州城，“其城壁表里各用砖灰五层包砌，糯米粥调灰铺砌城面兼楼橹，委皆雄壮，经久坚固”。明代修筑的南京城是世界上最大的砖石城垣，以条石为基、上筑夯土、外砌巨砖，用石灰作胶凝材料，在重要部位则用石灰加糯米汁灌浆，城垣上部用桐油和土拌和结顶，非常坚固。采用桐油或糯米汁拌和明矾与石灰制成的胶凝材料，其黏结性非常好，常用于修补假山石，至今在古建筑修缮中仍在沿用。

用有机物拌和“三合土”作建筑物的工法，在史料中屡有所见。明代《天工开物》一书中记载：“用以襄墓及贮水池则灰一分入河沙，黄土二分，用糯米、羊桃藤汁和匀，经筑坚固，永不隳坏，名曰三合土。”在中国建筑史上看到，清康熙乾隆年间，北京卢沟桥南北岸，用糯米汁拌“三合土”建筑河堤数里，使北京南郊从此免去水患之害。在石桥建筑史中记载，用糯米和牛血拌“三合土”砌筑石桥，凝固后与花岗石一样坚固。糯米汁拌“三合土”的建筑物非常坚硬，还有韧性，用铁镐刨时会迸发出火星，有的甚至要用火药才能炸开。

中国历史悠久，在人类文明创造过程中有过辉煌成就，做出过重要贡献。英国著名科学家、史学家李约瑟在《中国科学技术史》一书中写道：“在公元3世纪到13世纪之间，中国保持着西方国家所望尘莫及的科学知识水平”；“中国的那些发明和发现远远超过同时代的欧洲，特别是在15世纪之前更是如此”。中国古代建筑胶凝材料发展的过程是从“白灰面”和黄泥浆起步，发展到石灰和“三合土”，进而发展到石灰掺有机物的胶凝材料。从这段历史进程可以得出与科学史学家李约瑟相似的结论，中国古代建筑胶凝材料有过自己辉煌的历史，在与西方古代建筑胶凝材料基本同步发展的过程中，由于广泛采用石灰与有机物相结合的胶凝材料而显得略高一筹。

然而，近几个世纪以来中国落后了，尤其是到清朝乾隆年间末期，即18世纪末期以后，科学技术与西方差距越来越大。中国古代建筑胶凝材料的发展到达石灰掺有机物的胶凝材料阶段后就停滞不前，未能在此基点上跨出一步。西方古代建筑胶凝材料则在“罗马砂浆”的基础上继续发展，朝着现代水泥的方向不断提高，最终发明了水泥。



引 例

某砌筑工程采用了石灰砂浆内墙抹面，干燥硬化后，墙面出现了部分网格状开裂及部分放射状裂纹(图3.1)，分析原因。



图3.1 墙面裂缝局部示意图

3.1 气硬性胶凝材料

凡在一定条件下，经过自身的一系列物理、化学作用后，能将散粒或块状材料黏结成为具有一定强度的整体的材料，统称为胶凝材料。胶凝材料可分为有机和无机两大类。有机胶凝材料主要有沥青、树脂等。无机胶凝材料按硬化时的条件不同又可分为气硬性胶凝材料和水硬性胶凝材料。气硬性胶凝材料只能在空气中凝结硬化，保持并继续发展其强度，典型材料有石灰、石膏、水玻璃等。水硬性胶凝材料既能在空气中硬化又能在水中硬化，保持并继续发展其强度，典型材料如水泥。

3.1.1 石灰

石灰是建筑上使用时间较长、应用较广泛的一种气硬性胶凝材料。由于其原料来源广、生产工艺简单、成本低等优点，被广泛地应用于建筑领域。

1. 石灰的生产和品种

1) 石灰的生产

生产石灰的原料是以碳酸钙($CaCO_3$)为主要成分的天然矿石，如石灰石、白垩、白云质石灰石等。将原料在高温下煅烧即可得到石灰(块状生石灰)，其主要成分为氧化钙。在这一反应过程中由于原料中同时含有一定量的碳酸镁，在高温下会分解为氧化镁及二氧化碳，因此生成物中也会有氧化镁存在。其反应如下：

$$CaCO_3 = CaO + CO_2\uparrow$$

$$MgCO_3 = MgO + CO_2\uparrow$$

一般来说，在正常温度和煅烧时间条件下所煅烧的石灰具有多孔、颗粒细小、体积密度小以及与水反应速度快等特点，这种石灰称为正火石灰。而实际生产过程中由于煅烧过低或温度过高会产生欠火或过火石灰。

如煅烧温度较低，不仅使煅烧的时间过长，而且石灰块的中心部位还没有完全分解，石灰中含有未分解完的碳酸钙，此时称其为欠火石灰，它会降低石灰的利用率，但欠火石灰在使用时不会带来危害。

如煅烧温度过高，使煅烧后得到的石灰结构致密、孔隙率小、体积密度大、晶粒粗大，易被玻璃物质包裹，因此它与水的化学反应速度极慢，称其为过火石灰。正火石灰已经水化，并且开始凝结硬化，而过火石灰才开始进行水化，且水化后的产物较反应前体积膨胀，导致已硬化后的结构产生裂纹或崩裂、隆起等现象，这对石灰的使用是非常不利的。

特别提示

生石灰烧制后一般是块状，表面可观察到部分疏松贯通孔隙，由于含有一定杂质，并非呈现氧化钙的纯白色，而是多呈浅白色或灰白色，称为块灰。

2) 石灰的品种

根据石灰中氧化镁含量的不同，将生石灰分为钙质生石灰(MgO≤5%)和镁质生石灰

($MgO>5\%$)。将消石灰粉分为钙质消石灰粉($MgO<4\%$)、镁质消石灰粉($4\%\leqslant MgO<24\%$)和白云石消石灰粉($24\%\leqslant MgO<30\%$)。

目前应用最广泛的是将生石灰粉碎、筛选制成灰钙粉用于泥子等材料中。此外还有主要成分为氢氧化钙的熟石灰(消石灰)和含有过量水的熟石灰(石灰膏)。

2. 石灰的熟化和硬化

1) 石灰的熟化

石灰的熟化是指生石灰(氧化钙)与水发生水化反应生成熟石灰(氢氧化钙)的过程。这一过程也叫做石灰的消解或消化。其反应方程式为：

$$CaO + H_2O = Ca(OH)_2 + 64.83kJ$$

生石灰熟化具有如下特点。

(1) 水化放热大，水化放热速度快。这主要是由生石灰的多孔结构及晶粒细小而决定的。其最初一小时放出的热量是硅酸盐水泥水化一天放出热量的9倍。

(2) 水化过程中体积膨胀。生石灰在熟化过程中其外观体积可增大1～2.5倍。煅烧良好、氧化钙含量高的生石灰，其熟化速度快、放热量大、体积膨胀也大。

生石灰的熟化主要是通过以下过程来完成的：将生石灰块置于化灰池中，加入生石灰量的3～4倍的水熟化成石灰乳，通过筛网过滤渣子后流入储灰池，经沉淀除去表层多余水分后得到的膏状物称为石灰膏，石灰膏含水约50%，体积密度为1 300～1 400kg/m^3。一般1kg生石灰可熟化成1.5～3L的石灰膏。为了消除过火石灰在使用过程中造成的危害，通常将石灰膏在储灰池中存放两周以上，使过火石灰在这段时间内充分地熟化，这一过程叫做“陈伏”。陈伏期间，石灰膏表面应敷盖一层水(也可用细砂)以隔绝空气，防止石灰浆表面碳化，此种方法称为化灰法。

消石灰粉的熟化方法是：每半米高的生石灰块淋适量的水(生石灰量的60%～80%)，直至数层，经熟化得到的粉状物称为消石灰粉，加水量以消石灰粉略湿但不成团为宜。这种方法称为淋灰法。

2) 石灰的硬化

石灰的硬化过程主要有结晶硬化和碳化硬化两个过程。

(1) 结晶硬化。这一过程也可称为干燥硬化过程，在这一过程中，石灰浆体的水分蒸发，氢氧化钙从饱和溶液中逐渐结晶出来。干燥和结晶使氢氧化钙产生一定的强度。

(2) 碳化硬化。碳化硬化过程实际上是水与空气中的二氧化碳首先生成碳酸，然后再与氢氧化钙反应生成碳酸钙，同时析出多余水分并蒸发，这一过程的反应式为：

$$Ca(OH)_2 + CO_2 + nH_2O = CaCO_3 + (n+1)H_2O$$

生成的碳酸钙晶体互相共生或与氢氧化钙颗粒共生，构成紧密交织的结晶网，从而使浆体强度提高。上述两个过程是同时进行的，在石灰浆体的内部，对强度起主导作用的是结晶硬化过程，而在浆体表面与空气接触的部分进行的是碳化硬化，由于外部碳化硬化形成的碳酸钙膜达一定厚度时，就会阻止外界的二氧化碳向内部渗透和内部水分向外蒸发，再加上空气中二氧化碳的浓度较低，所以碳化过程一般较慢。

3．石灰的现行标准与技术要求

1) 分类与标记

根据现行行业标准《建筑生石灰》(JC/T 479—2013)，按生石灰的加工情况分为建筑生石灰和建筑生石灰粉，按生石灰的化学成分分为钙质石灰和镁质石灰两类。根据化学成分的含量每类分成各个等级，具体分类见表 3-1。生石灰的识别标志由产品名称、加工情况和产品依据标准编号组成。生石灰块在代号后加 Q，生石灰粉在代号后加 QP。

示例：符合 JC/T 479—2013 的钙质生石灰粉 90 标记如下。

CL 90-QP　JC/T 479—2013

说明：　CL——钙质石灰；

90——(CaO+MgO)百分含量；

QP——粉状；

JC/T 479—2013——产品依据标准。

表 3-1　建筑生石灰的分类(JC/T 479—2013)

类　别	名　称	代　号
钙质石灰	钙质石灰 90	CL90
	钙质石灰 85	CL85
	钙质石灰 75	CL75
镁质生石灰	镁质石灰 85	ML85
	镁质石灰 80	ML80

2) 技术要求

建筑生石灰的化学成分应符合表 3-2 要求。

表 3-2　建筑生石灰的化学成分(JC/T 479—2013)

名　称	(CaO+MgO)含量	MgO	CO_2	SO_3
CL90-Q CL90-QP	≥90	≤5	≤4	≤2
CL85-Q CL85-QP	≥85	≤5	≤7	≤2
CL75-Q CL75-QP	≥75	≤5	≤12	≤2
ML85-Q ML85-QP	≥85	>5	≤7	≤2
ML80-Q ML80-QP	≥80	>5	≤7	≤2

建筑生石灰的物理性质应符合表 3-3 要求。

表 3-3 建筑生石灰的物理性质(JC/T 479—2013)

名称	产浆量/(dm^3/10kg)	细度	
		0.2mm 筛余量(%)	90um 筛余量(%)
CL90-Q	≥26	—	—
CL90-QP	—	≤2	≤7
CL85-Q	≥26	—	—
CL85-QP	—	≤2	≤7
CL75-Q	≥26	—	—
CL75-QP	—	≤2	≤7
ML85-Q	—	—	—
ML85-QP		≤2	≤7
ML80-Q	—	—	—
ML80-QP		≤7	≤2

注：其他物理特性，根据用户要求，可按照 JC/T 487.1 进行测试。

《建筑消石灰粉》的使用需要满足(JC/T 481—2013)行业标准的规定。

4. *石灰的性质及应用*

1) 石灰的技术性质

(1) 保水性、可塑性好。材料的保水性就是材料保持水分不泌出的能力。石灰加水后，由于氢氧化钙的颗粒细小，其表面吸附一层厚厚的水膜，降低了颗粒之间的摩擦力，具有良好的塑性，易铺摊成均匀的薄层，而这种颗粒数量多，总表面积大，所以石灰又具有很好的保水性；又由于颗粒间的水膜使得颗粒间的摩擦力较小，使得石灰浆具有良好的保水性，石灰的这种性质常用来改善水泥砂浆的和易性。

(2) 凝结硬化慢、强度低。石灰是一种气硬性胶凝材料，因此它只能在空气中硬化，而空气中 CO_2 含量低，且碳化后形成较硬的 $CaCO_3$ 薄膜阻止外界 CO_2 向内部渗透，同时又阻止了内部水分向外蒸发，结果导致 $CaCO_3$ 及 $Ca(OH)_2$ 晶体生成的量少且速度慢，使硬化体的强度较低。此外，虽然理论上生石灰消化需要约 32.13%的水，而实际上用水量却很大，多余的水分蒸发后在硬化体内留下大量孔隙，这也是硬化后石灰强度很低的一个原因。经测定石灰砂浆(1∶3)的 28d 抗压强度仅 0.2～0.5MPa。

(3) 耐水性差。由于石灰浆体硬化慢、强度低，在石灰浆体中，大部分仍是尚未碳化的 $Ca(OH)_2$，而 $Ca(OH)_2$ 易溶于水，从而使硬化体溃散，故石灰不宜用于潮湿环境中。

(4) 硬化时体积收缩大。由于石灰浆中存在大量的游离水，硬化时大量水分因蒸发失去，导致内部毛细管失水紧缩，从而引起体积收缩，所以除用石灰乳做薄层粉刷外，不宜单独使用。常在施工中掺入砂、麻刀、无机纤维等，以抵抗收缩引起的开裂。

(5) 吸湿性强。生石灰吸湿性强、保水性好，是一种传统的干燥剂。

(6) 化学稳定性差。石灰是一种碱性材料，遇酸性物质时易发生化学反应，生成新物质。石灰材料容易遭受酸性介质的腐蚀。

特别提示

【原因分析】出现引例现象的原因如下。

(1) 网状裂纹主要是由于石灰本身的干燥收缩大(砂掺量偏少)引起的。

(2) 放射状裂纹是由于存在过火石灰大颗粒而石灰又未能充分熟化而引起的。

在实际工程中，广泛采用含有石灰成分的砂浆，如石灰砂浆、水泥石灰混合砂浆、石灰麻刀(纸筋)灰浆等作为内墙或天棚的抹面材料。施工中经常会出现这样一些现象，即在抹灰面施工完或使用一个阶段后，抹灰面会出现一个个炸裂的小坑或鼓包，即爆灰。引例中第二种现象即是爆灰。

2) 石灰的应用

(1) 制作石灰乳涂料。将石灰加水调制成石灰乳，可用作内、外墙及顶棚涂料，一般多用于内墙涂料。

(2) 拌制建筑砂浆。将消石灰粉与砂子、水混合拌制石灰砂浆或消石灰粉与水泥、砂子、水混合拌制石灰水泥混合砂浆，用于抹灰或砌筑，后者在建筑工程中用量很大。

(3) 拌制三合土和灰土。将生石灰粉、黏土按一定的比例配合，并加水拌和得到的混合料叫作灰土，如工程中的三七灰土、二八灰土(分别表示熟石灰和黏土的体积比例为3∶7和2∶8)等，夯实后可以作为建筑物的基础、道路路基及垫层。将生石灰粉、黏土、砂按一定比例配合，并加水拌和得到的混合料叫作三合土，夯实后可作为路基或垫层。

(4) 生产硅酸盐制品。将石灰与硅质原料(石英砂、粉煤灰、矿渣等)混合磨细，经成形、养护等工序后可制得人造石材，由于它以水化硅酸钙为主要成分，因此又叫作硅酸盐混凝土。这种人造石材可以加工成各种砖及砌块。

(5) 地基加固。对于含水的软弱地基，可以将生石灰块灌入地基的桩孔捣实，利用石灰消化时体积膨胀所产生的巨大膨胀压力而将土壤挤密，从而使地基土获得加固效果，俗称为石灰桩。

5. 石灰的储运

石灰在储运中必须注意，生石灰要在干燥的条件下运输和储存。运输中要有防雨措施，不得与易燃易爆等危险液体物品混合存放和运输。如长时间存放生石灰，则必须密闭防水、防潮，一般存放不超过一个月，做到“随到随化”，将储存期变为熟化期。消石灰储运时应包装密封，以隔绝空气、防止碳化。

3.1.2 石膏

1. 石膏的原料及生产

1) 石膏的原料

生产石膏的原料有天然二水石膏、天然无水石膏和化工石膏等。

天然二水石膏又称软石膏或生石膏。它的主要成分为含两个结晶水的硫酸钙($CaSO_4 \cdot 2H_2O$)。二水石膏晶体无色透明，当含有少量杂质时，呈灰色、淡黄色或淡红色，其密度约为2.2～2.4g/cm^3，难溶于水，它是生产建筑石膏和高强石膏的主要原料。

2) 石膏的生产

(1) 建筑石膏。将天然石膏入窑经低温煅烧后，磨细即得建筑石膏，其反应式如下。

$$CaSO_4 \cdot 2H_2O = CaSO_4 \cdot 1/2H_2O + 1.5H_2O$$

天然二水石膏的成分为二水硫酸钙，建筑石膏的成分为半水硫酸钙，由此可见建筑石膏是天然二水石膏脱去部分结晶水得到的β型半水石膏。建筑石膏为白色粉末，松散堆积密度为800～1 000kg/m^3，密度为2 500～2 800kg/m^3。

(2) 高强石膏。将二水石膏置于蒸压锅内，经0.13MPa的水蒸气(125℃)蒸压脱水，得到晶粒比β型半水石膏粗大的产品，称为α型半水石膏，将此石膏磨细得到的白色粉末称为高强石膏。

高强石膏由于晶体颗粒较粗、表面积小，拌制相同稠度时需水量比建筑石膏少(约为建筑石膏的一半)，因此该石膏硬化后结构密实、强度高(7d可达15～40MPa)。高强石膏生产成本较高，主要用于室内高级抹灰、装饰制品和石膏板等。若掺入防水剂可制成高强度抗水石膏，在潮湿的环境中使用。

2. 石膏的凝结与硬化

建筑石膏与适量水拌和后形成浆体，然后水分逐渐蒸发，浆体失去可塑性，逐渐形成具有一定强度的固体。其反应式为：

$$CaSO_4 \cdot 0.5H_2O + 1.5H_2O \rightleftharpoons CaSO_4 \cdot 2H_2O$$

这一反应是建筑石膏生产的逆反应，其与石膏生产的主要区别在于此反应是在常温下进行的。另外，由于半水石膏的溶解度高于二水石膏，所以上述可逆反应总体表现为向右进行，即表现为沉淀反应。就其物理过程来看，随着二水石膏沉淀的不断增加也会产生结晶。随着结晶体的不断生成和长大，晶体颗粒之间便产生了摩擦力和黏结力，造成浆体开始失去可塑性，这一现象称为石膏的初凝。而后，随着晶体颗粒间摩擦力和黏结力的增加，浆体最终完全失去可塑性，这种现象称为石膏的终凝。整个过程称为石膏的凝结。石膏终凝后，其晶体颗粒仍在不断长大和连生，形成相互交错且孔隙率逐渐减小的结构，其强度也会不断增大，直至水分完全蒸发，形成硬化后的石膏结构，这一过程称为石膏的硬化。建筑石膏的水化、凝结及硬化是一个连续的、不可分割的过程，也就是说，水化是前提，凝结硬化是结果。

3. 建筑石膏的技术要求

根据《建筑石膏》(GB/T 9776—2008)规定，建筑石膏的主要技术要求为强度、细度和凝结时间，据此可分为优等品、一等品和合格品3个等级，具体指标见表3-4。

表3-4 建筑石膏等级标准(GB/T 9776—2008)

技术指标		优等品	一等品	合格品
强度/MPa	抗折强度≥	2.5	2.1	1.8
	抗压强度≥	4.9	3.9	2.9
细度	0.2mm方孔筛筛余(%)≤	5.0	10.0	15.0
凝结时间/min	初凝时间①≥	6		
	终凝时间②≤	30		

注：指标中有一项不合格者，应予以降级或报废处理。

(1)将浆体开始失去可塑性的状态称为浆体初凝，从加水至失去可塑性这段时间称为初凝时间。

(2)至浆体完全失去可塑性并开始产生强度称为浆体终凝，从加水至完全失去可塑性称为浆体的终凝时间。

4. 建筑石膏的性质

1) 凝结硬化快

建筑石膏的凝结硬化速度很快，国家标准规定初凝不小于6min，终凝不大于30min，如在自然干燥条件下，一周左右可完全硬化。由于石膏的凝结速度太快，为方便施工，常掺加适量的缓凝剂(如硼砂、骨胶等)来延缓其凝结速度。

2) 硬化时体积微膨胀

建筑石膏硬化时具有微膨胀性，其体积膨胀率约为0.05%～0.15%。石膏的这一特性使得它的制品表面光滑、棱角清晰、线脚饱满、装饰性好，常用来制作石膏制品。

3) 孔隙率大、表观密度小、强度低、保温和吸声性好

建筑石膏的水化反应理论上需水量仅为18.6%，但在搅拌时为了使石膏充分溶解、水化并使得石膏浆体具有施工要求的流动度，实际加水量达50%～70%，而多余的水分蒸发后在石膏硬化体的内部将留下大量的孔隙，其孔隙率可达50%～60%。由于这一特性使石膏制品导热系数小，仅为0.121～0.205W/(m·K)、保温隔热性能好，但其强度较低。由于硬化体的多孔结构特点，使建筑石膏具有质轻、保温隔热、吸声性强等优点。

4) 具有一定的调温、调湿作用

建筑石膏制品的热容量大、吸湿性强，因此，可对室内空气具有一定调节温度和湿度的作用。

5) 防火性好、耐火性差

建筑石膏制品的导热系数小、传热速度慢，且二水石膏受热脱水产生的水蒸气蒸发并吸收热量，能有效阻止火势的蔓延。但二水石膏脱水后，强度显著下降，故建筑石膏制品不耐火。

6) 装饰性好、可加工性好

建筑石膏制品表面平整，色彩洁白，并可以进行锯、刨、钉、雕刻等加工，具有良好的装饰性和可加工性。

7) 耐水性和抗冻性差

建筑石膏是气硬性胶凝材料，吸水性大，长期在潮湿的环境中，其晶粒间的结合力会削弱直至溶解，故石膏的耐水性差。另外，建筑石膏中的水分一旦受冻会产生破坏，即抗冻性差。

5. 建筑石膏的应用与储运

1) 室内抹灰及粉刷

建筑石膏加水、砂及缓凝剂拌和成石膏砂浆，用于室内抹灰或作为油漆打底使用，其特点是隔热保温性能好、热容量大、吸湿性强，因此可以一定限度地调节室内温度、湿度，保持室温的相对稳定，此外这种抹灰墙面还具有阻火、吸声、施工方便、凝结硬化快、黏结牢固等特点，因此可称其为室内高级粉刷及抹灰材料。石膏砂浆抹灰的墙面和顶棚可直接涂刷油漆或粘贴墙布或墙纸等。

2) 建筑石膏制品

随着框架轻板结构的发展，石膏板的生产和应用也迅速发展起来。由于石膏板具有原料来源广泛、生产工艺简便、轻质、保温、隔热、吸声、不燃及可锯可钉性等特点，因此

它被广泛应用于建筑行业。常用的石膏板有纸面石膏板、纤维石膏板、装饰石膏板、空心石膏板、吸声用穿孔石膏板等。以模型石膏为主要原料，掺加少量纤维增强材料和胶料，加水搅拌成石膏浆体，将浆体注入模具中，就得到了各种建筑装饰制品，如多孔板、花纹板、浮雕板等。

石膏在运输储存的过程中应注意防水、防潮。另外长期储存会使石膏的强度下降很多(一般储存3个月后强度会下降30%左右)，因此建筑石膏不宜长期储存。一旦储存时间过长，应重新检验确定等级。

知识链接

纸面石膏板主要用于建筑隔墙(非承重墙)及室内吊顶，工程中应用非常广泛。纸面石膏板在性能上有以下特点。

(1) 具有一定的隔声性能。纸面石膏板采用单一轻质材料，而加气混凝土、膨胀珍珠岩板等构成的单层墙体，其厚度很大时才能满足隔声的要求。而用纸面石膏板、轻钢龙骨和岩棉制品制成的隔墙是利用空腔隔声的，隔声效果好。

(2) 收缩较小。纸面石膏板化学物理性能稳定，干燥吸湿过程中伸缩率较小，有效克服了目前国内其他轻质板材在使用过程中由于自身伸缩较大而引起接缝开裂的缺陷。

(3) 重量轻、强度能满足使用要求。纸面石膏板的厚度一般为9.5～12mm，每平方米自重只有6～12kg。用两张纸面石膏板中间夹轻钢龙骨就是很好的隔墙，该纸面石膏板墙体每平方米自重不超过30～45kg，仅为普通砖墙的1/5左右。用纸面石膏板作为内墙材料，其强度也能满足要求，厚度12mm的纸面石膏板纵向断裂载荷可达500N以上。

(4) 具有一定的湿度调节作用。由于纸面石膏板的孔隙率较大并且孔结构分布适当，所以具有较高的透气性能。当室内湿度较高时可吸湿，而当空气干燥时又可放出一部分水分，因而纸面石膏板对室内湿度起到一定的调节作用，国外将纸面石膏板的这种功能称为“呼吸”功能。另外纸面石膏板经防潮处理后，可用于如宾馆、饭店、住宅等居住单元的卫生间、浴室等；纸面石膏板也可用于常年保持高潮湿或有明显水蒸气的环境，如公共浴室、厨房操作间、高湿工业场所、地下室等。

(5) 具有良好的防火性能。纸面石膏板是一种耐火建筑材料，内有大约2%的游离水，纸面石膏板遇火时，这部分水首先汽化，能消耗部分热量，延缓了墙体温度的上升。另外纸面石膏板中的水化物是二水石膏，它含有相当于全部重量20%左右的结晶水。当板面温度上升到80℃以上时，纸面石膏板开始分解出结晶水，并在面向火源的表面产生一层水蒸气幕，产生良好的防火效果。纸面石膏板芯材(二水硫酸钙)脱水成为无水石膏(硫酸钙)，同时吸收了大量的热量，从而延缓了墙体温度的上升，给消防救护工作提供了宝贵的时间。

3.1.3 水玻璃

1. 水玻璃的组成

水玻璃俗称泡花碱，是由碱金属氧化物和二氧化硅按不同比例化合而成的一种可溶于水的硅酸盐。常用的水玻璃有硅酸钠($Na_2O \cdot nSiO_2$)水溶液(钠水玻璃)和硅酸钾($K_2O \cdot nSiO_2$)水溶液(钾水玻璃)。水玻璃分子式中SiO_2与Na_2O(或K_2O)的分子数比值n叫作水玻璃的模

数。水玻璃的模数越大，越难溶于水，越容易分解硬化，硬化后黏结力、强度、耐热性与耐酸性越高。

液体水玻璃因所含杂质不同，呈青灰色、绿色或黄色，以无色透明的液体水玻璃为最好，建筑上常用钠水玻璃的模数 n 为 2.5～3.5，密度为 1.3～1.4g/cm^3。

2. 水玻璃的硬化

水玻璃溶液在空气中吸收 CO_2 气体，析出无定形二氧化硅凝胶(硅胶)并逐渐干燥硬化，反应式为：

$$Na_2O \cdot nSiO_2 + CO_2 + mH_2O = nSiO_2 \cdot mH_2O + Na_2CO_3$$

由于空气中 CO_2 浓度较低，为加速水玻璃的硬化，可加入氟硅酸钠(Na_2SiF_6)作为促硬剂，以加速硅胶的析出，反应式为：

$$2Na_2O \cdot nSiO_2 + Na_2SiF_6 + mH_2O = (2n+1)SiO_2 \cdot mH_2O + 6NaF$$

氟硅酸钠的适宜加入量为水玻璃质量的 12%～15%，加入氟硅酸钠后，水玻璃的初凝时间可缩短到 30～50min，终凝时间可缩短到 240～360min，7d 基本达到最高强度；如其加入量超过 15%，则凝结硬化速度很快，造成施工困难。值得注意的是，氟硅酸钠有毒，操作时应该注意安全。

3. 水玻璃的性质

1) 黏结力强、强度较高

水玻璃硬化具有良好的黏结能力和较高的强度，这主要是由于在硬化过程中析出的硅酸凝胶具有很强的黏附性，用水玻璃配制的玻璃混凝土，抗压强度可达到 15～40MPa。

2) 耐酸性好

硬化后水玻璃的主要成分是硅酸凝胶，而硅酸凝胶不与酸类物质反应，因而水玻璃具有很好的耐酸性，可抵抗除氢氟酸、过热磷酸以外的几乎所有的无机和有机酸。

3) 耐热性好

硅酸凝胶具有高温干燥增加强度的特性，因而水玻璃具有很好的耐热性。水玻璃的耐热温度可达 1 200℃。

4. 水玻璃的应用

1) 涂刷材料表面，提高材料的抗风化能力

硅酸凝胶可填充材料的孔隙使材料致密，提高了材料的密实度、强度、抗渗性、抗冻性及耐水性等，从而提高了材料的抗风化能力。但不能用以涂刷或浸渍石膏制品，因两者会发生反应，在制品孔隙中生成硫酸钠结晶，体积膨胀，将制品胀裂。

特别提示

以一定密度的水玻璃浸渍或涂刷黏土砖、水泥混凝土、石材等多孔材料，可提高材料的密实度、强度、抗渗性、抗冻性及耐水性。因为水玻璃与空气中的二氧化碳反应生成硅酸凝胶，同时水玻璃也与材料中的氢氧化钙反应生成硅酸钙凝胶，两者填充于材料的孔隙中，使材料趋于致密。

2) 耐酸性的应用

水玻璃具有较高的耐酸性，用水玻璃和耐酸粉料，粗细集料配合，可制成防腐工程的耐酸胶泥、耐酸砂浆和耐酸混凝土等。

3) 耐热性的应用

水玻璃硬化后形成 SiO_2 非晶态空间网状结构，具有良好的耐火性，因此可与耐热晶粒一起配制成耐热砂浆、耐热混凝土及耐热胶泥等。

4) 配制速凝防水剂

水玻璃加两种、三种或四种矾，即可配制成二矾、三矾、四矾速凝防水剂，从而提高砂浆的防水性。其中四矾防水剂凝结迅速，一般不超过 1min，适用于堵塞漏洞、缝隙等局部抢修工程。但由于凝结过快，不宜调配用作屋面或地面的刚性防水层的水泥防水砂浆。

5) 加固土壤

将水玻璃与氯化钙溶液分别压入土壤中，两种溶液会发生反应生成硅酸凝胶，这些凝胶体包裹土壤颗粒，填充空隙、吸水膨胀，使土壤固结，提高地基的承载力，同时使其抗渗性也得到提高。

知识链接

菱苦土又名苛性苦土、苦土粉，它的主要成分是氧化镁，是一种纯白或灰白色、细粉状的气硬性胶结材料。菱苦土用水拌和时，生成结构疏松、胶凝性较差的 $Mg(OH)_2$。为改善其性能，工程中常用 $MgCl_2$ 溶液拌和，拌后浆体硬化较快，强度较高(可达 40～60MPa)，但其吸湿性强、耐水性较差(水会溶解其中的可溶性盐类)。

菱苦土与植物纤维黏结性好，不会引起纤维的分解。因此，常与木丝、木屑等木质纤维混合应用，制成菱苦土木屑地板、木丝板及刨花板等制品，也可进一步加工成家具等制品。菱苦土板有较高的紧密度和强度，且具有隔热、吸声效果，可作内墙和天花板材料，在菱苦土中加泡沫剂，还可制成轻质多孔的绝热材料。

菱苦土耐水性较差，故其制品不宜用于长期潮湿的地方。菱苦土在使用过程中，常用 $MgCl_2$ 水溶液调制，其中氯离子对钢筋有锈蚀作用，故其制品中不宜配置钢筋。

3.2 水　　泥

水泥是一种水硬性胶凝材料，呈粉末状，加水拌和成浆体后能胶结砂、石等散粒材料，能在空气和水中硬化并保持、发展其强度。水泥的种类很多，按其主要成分可分为硅酸盐类水泥、铝酸盐类水泥、硫铝酸盐类水泥和磷酸盐类水泥；按水泥的用途和性能，又可分为通用水泥(如硅酸盐水泥、矿渣硅酸盐水泥)、专用水泥(如道路水泥)及特性水泥(如快硬硅酸盐水泥、膨胀水泥)。今后水泥的发展趋势为：在水泥品种方面，将加速发展快硬、高强、低热等特种和多用途的水泥；大力发展水泥外加剂；大力发展高强度等级水泥。

知识链接

现代意义上的水泥是 1824 年由英国建筑工人阿斯普丁发明的，是通过煅烧石灰石与黏土的混合料得出一种胶凝材料，它制成砖块很像由波特兰半岛采下来的波特兰石，由此将这种胶凝

材料命名“波特兰水泥”。自1824年波特兰水泥问世以来，水泥和水泥基材料已成为当今世界最大宗的人造材料。2008年，我国水泥总需求量达到了13.88亿t，占世界水泥用量的近1/3。

3.2.1 通用水泥

通用水泥，即通用硅酸盐水泥，是以硅酸盐熟料和适量的石膏及规定的混合材料制成的水硬胶凝材料，用于一般土木建筑工程中。通用硅酸盐水泥按混合材料的品种和掺加量分为硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥、矿渣硅酸盐水泥、火山灰质硅酸盐水泥、粉煤灰硅酸盐水泥和复合硅酸盐水泥。通用硅酸盐水泥品种、代号及组分，见表3-5。

表3-5 通用硅酸盐水泥品种、代号及组分

品 种	代号	组分(质量分数)(%)				
		熟料＋石膏	粒化高炉矿渣	火山灰质混合材料	粉煤灰	石灰石
硅酸盐水泥	P·I	100	—	—	—	—
	P·II	≥95	≤5	—	—	—
		≥95	—	—	—	≤5
普通硅酸盐水泥	P·O	≥80且<95	>5且≤20			—
矿渣硅酸盐水泥	P·S·A	≥50且<80	>20且≤50	—	—	—
	P·S·B	≥30且<50	>50且≤70	—	—	—
火山灰质硅酸盐水泥	P·P	≥60且<80	—	>20且≤40	—	—
粉煤灰硅酸盐水泥	P·F	≥60且<80	—	—	>20且≤40	—
复合硅酸盐水泥	P·C	≥50且<80	>20且≤50			



1. 硅酸盐水泥熟料

由主要含CaO、SiO_2、Al_2O_3、Fe_2O_3的原料，按适当比例磨成细粉烧至部分熔融所得的以硅酸钙为主要矿物质成分的水硬性胶凝物质。其中硅酸钙矿物质含量(质量分数)不小于66%，氧化钙和氧化硅质量比不小于2.0。

2. 混合材料

混合材料一般为天然的矿物材料或工业废料。根据其性能可分为活性混合材料和非活性混合材料。常用的活性混合材料有：粒化高炉矿渣、火山灰质混合材料和粉煤灰等。

(1) 粒化高炉矿渣。将炼铁高炉中的熔融矿渣经水淬等方式急速冷却而形成的松软颗粒，称为粒化高炉矿渣，又称水淬高炉矿渣，其主要的化学成分是CaO、SiO_2和Al_2O_3，占90%以上。

(2) 火山灰质混合材料。凡是天然或人工的以活性SiO和活性Al_2O_3为主要成分，具有火山灰活性的矿物质材料，都称为火山灰质混合材料。

(3) 粉煤灰。

粉煤灰是发电厂燃煤锅炉排出的烟道灰，其颗粒直径一般为 0.001～0.05mm，呈玻璃态实心或空心的球状颗粒，表面比较致密。粉煤灰的成分主要是活性 SiO 和活性 Al_2O_3。

活性混合材料的矿物成分主要是活性 SiO_2 和活性 Al_2O_3，它们与水泥熟料的水化产物——$Ca(OH)_2$ 发生反应，生成水化硅酸钙和水化铝酸钙，称为二次水化反应。$Ca(OH)_2$ 是易受腐蚀的成分，活性 SiO 和活性 Al_2O_3 与 $Ca(OH)_2$ 作用后，减少了水泥水化产物 $Ca(OH)_2$ 的含量，相应提高了水泥石的抗腐蚀性能。

非活性混合材料又称填充材料，它与水泥矿物成分或水化产物不起化学反应。掺入水泥中主要起调节水泥强度等级、增加水泥产量、降低水化热等作用。常用的有磨细石英砂、石灰石粉、黏土及磨细的块状高炉矿渣与炉灰等。

3.2.2 硅酸盐水泥的生产及矿物组成

以下以硅酸盐水泥为例说明水泥的生产及矿物组成。

以石灰质原料(如石灰石等)与黏土质原料(如黏土、页岩等)为主，有时加入少量铁矿粉等，按一定比例配合，磨细成生料粉(干法生产)或生料浆(湿法生产)，经均化后送入回转窑或立窑中煅烧至部分熔融，得到以硅酸钙为主要成分的水泥熟料，再与适量石膏共同磨细，即可得到硅酸盐水泥。其生产工艺流程(简称为“两磨一烧”)如图 3.2 所示。

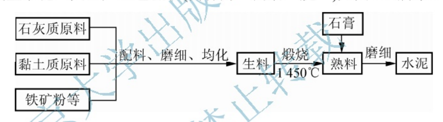


图 3.2 硅酸盐水泥生产工艺流程示意图

矿物组成主要有以下几种。

(1) 硅酸三钙($3CaO{\cdot}SiO_2$，简写为 C_3S，占 37%～60%)。

(2) 硅酸二钙($2CaO{\cdot}SiO_2$，简写为 C_2S，占 15%～37%)。

(3) 铝酸三钙($3CaO{\cdot}Al_2O_3$，简写为 C_3A，占 7%～15%)。

(4) 铁铝酸四钙($4CaO{\cdot}Al_2O_3{\cdot}Fe_2O_3$，简写为 C_4AF，占 10%～18%)。

(5) 其他矿物组成——硅酸盐水泥熟料中还含有少量的游离氧化钙和游离氧化镁及少量的碱(氧化钠和氧化钾)。它们可能对水泥的质量及应用带来不利影响。

各种矿物单独与水作用时表现出不同的性能，见表 3-6。

表 3-6 硅酸盐水泥熟料矿物特性

矿物名称	密度/(g/cm^3)	水化反应速率	水化放热量	强　度	耐腐蚀性
$3CaO{\cdot}SiO_2$	3.25	快	大	高	差
$2CaO{\cdot}SiO_2$	3.28	慢	小	早期低后期高	好
$3CaO{\cdot}Al_2O_3$	3.04	最快	最大	低	最差
$4CaO{\cdot}Al_2O_3{\cdot}Fe_2O_3$	3.77	快	中	低	中

由表3-6可知不同熟料矿物单独与水作用的特性是不同的：硅酸三钙的水化速度较快、水化热较大，且主要是早期放出，其强度最高，是决定水泥强度的主要矿物，一般来讲，硅酸三钙含量高说明熟料的质量好；硅酸二钙的水化速度最慢、水化热最小，且主要是后期放出，是保证水泥后期强度的主要矿物；铝酸三钙是水化速度最快、水化热最大的矿物，且水化时体积收缩最大；铁铝酸四钙的水化速度也较快，仅次于铝酸三钙，其水化热中等，有利于提高水泥抗拉强度。水泥是几种熟料矿物的混合物，改变矿物成分间比例时，水泥性质即发生相应的变化，由此可制成不同特性的水泥。

3.2.3 硅酸盐水泥的水化、凝结及硬化

1. 相关概念

1) 水化

物质由无水状态变为有水状态，由低含水变为高含水，统称为水化。

2) 凝结

水泥加水拌和初期形成具有可塑性的浆体，然后逐渐变稠并失去可塑性的过程称为凝结。

3) 硬化

浆体的强度逐渐提高并变成坚硬的石状固体(水泥石)，这一过程称为硬化。

2. 水泥的凝结硬化过程

水泥加水拌和后，未水化的水泥颗粒分散在水中成为水泥浆体。水泥的水化反应首先在水泥颗粒表面剧烈地进行，生成的水化物溶于水中。此种作用继续作用下去，使水泥颗粒周围的溶液很快地成为水化产物的饱和溶液。此后，水泥继续水化，在饱和溶液中生成的水化产物便从溶液中析出，包在水泥颗粒表面。水化产物中的氢氧化钙、水化铝酸钙和水化硫铝酸钙是结晶程度较高的物质，而数量多的水化硅酸钙则是大小为10^{-7}～10^{-5}m的粒子(或微晶)，比表面积大，相当于胶体物质，胶体凝聚便形成凝胶。由此可见，水泥水化物中有凝胶体和晶体。以水化硅酸钙凝胶为主体，其中分布着氢氧化钙晶体的结构，通常称之为凝胶体。

水化开始时，由于水化物尚不多，包有凝胶体膜层的水泥颗粒之间还是分离的，相互之间引力较小，此时水泥浆具有良好的塑性。随着水泥颗粒不断水化，凝胶体膜层不断增厚而破裂，并继续扩展，在水泥颗粒之间形成了网状结构，水泥浆体逐渐变稠，黏度不断增大，失去塑性，这就是水泥的凝结过程。以上过程继续进行，水化产物不断生成，并填充颗粒之间空隙，毛细孔越来越少，使结构更加紧密，水泥浆体逐渐产生强度而进入硬化阶段。

由上述可见，水泥的水化反应是由颗粒表面逐渐深入到内层的。当水化物增多时，堆积在水泥颗粒周围的水化物不断增加以至阻碍水分继续进入，使水泥颗粒内部的水化越来越困难，经过长时间(几个月甚至几年)的水化以后，多数颗粒仍剩余尚未水化的内核。因此，硬化后的水泥石是由凝胶体(凝胶和晶体)、未水化的水泥颗粒和毛细孔组成的不匀质结构体。

3. 影响硅酸盐水泥凝结硬化因素

1) 水泥的熟料矿物组成及细度

水泥熟料中各种矿物的凝结硬化特点不同，当水泥中各矿物的相对含量不同时，水泥的凝结硬化特点就不同。水泥磨得越细，水泥颗粒的平均粒径越小，比表面积越大，水化时与水的接触面越大，因而水化速度快，凝结硬化快，早期强度就高。

2) 水泥浆的水灰比

水泥浆的水灰比是指水泥浆中水与水泥的质量之比。当水泥浆中加水较多时水灰比较大，此时水泥的初期水化反应得以充分进行；但是水泥颗粒间原来被水隔开的距离较远，颗粒间相互连接形成骨架结构所需的凝结时间长，所以水泥浆凝结较慢且空隙多，降低了水泥石的强度。

3) 石膏的掺量

硅酸盐水泥中加入适量的石膏会起到良好的缓凝效果，且由于钙矾石的生成，还能提高水泥石的强度。但是石膏掺量过多时，可能危害水泥石的安定性。

4) 环境温度和湿度

水泥水化反应的速度与环境的温度有关，只有处于适当温度下，水泥的水化、凝结和硬化才能进行。通常，温度较高时，水泥的水化、凝结和硬化速度就较快。当环境温度低于0℃时，水泥水化趋于停止，就难以凝结硬化。

水泥水化是水泥与水之间的反应，必须在水泥颗粒表面保持有足够的水分，水泥的水化、凝结硬化才能充分进行。保持水泥浆温度和湿度的措施称为水泥的养护。

5) 龄期

水泥浆随着时间的延长水化物增多，内部结构就逐渐致密，一般来说，强度不断增长。

4. 水泥石的结构

硬化后的水泥石是由未水化的水泥颗粒、水化产物(主要包括水化硅酸钙凝胶体和结晶体)、凝胶体中的孔隙以及毛细孔(含有部分水分)所组成的多孔体系。

3.2.4 通用硅酸盐水泥的技术要求

1. 化学指标

通用水泥化学指标见表3-7。

表3-7 通用水泥化学指标

品　种	代号	不溶物(质量分数)(%)	烧失量(质量分数)(%)	三氧化硫(质量分数)(%)	氧化镁(质量分数)(%)	氯离子(质量分数)(%)
硅酸盐水泥	P·I	≤0.75	≤3.0	≤3.5	≤5.0	≤0.06
	P·II	≤1.50	≤3.5			
普通硅酸盐水泥	P·O	—	≤5.0			

续表

品　种	代号	不溶物(质量分数)(%)	烧失量(质量分数)(%)	三氧化硫(质量分数)(%)	氧化镁(质量分数)(%)	氯离子(质量分数)(%)
矿渣硅酸盐水泥	P·S·A	—	—	≤4.0	≤6.0	
	P·S·B	—	—		—	
火山灰硅酸盐水泥	P·P	—	—	≤3.5	≤6.0	
粉煤灰硅酸盐水泥	P·F	—	—			
复合硅酸盐水泥	P·C	—	—			

注：(1)如果水泥蒸压试验合格，则水泥中氧化镁的含量(质量分数)允许放宽至6.0%。
(2)如果水泥中氧化镁的含量(质量分数)大于6.0%时，需进行水泥蒸压安定性试验并合格。
(3)当有更低要求时，该指标由买卖双方确定。

2. 碱含量(选择性指标)

水泥中碱含量按 $Na_2O+0.685K_2O$ 计算值表示。若使用活性骨料，用户要求提供低碱水泥时，水泥中的碱含量应不大于0.60%或由买卖双方协商确定。

3. 物理指标

1) 凝结时间

凝结时间分初凝和终凝时间。初凝时间是指从水泥全部加入水中，到水泥开始失去可塑性所需的时间；终凝时间是指从水泥全部加入水中，到水泥完全失去可塑性开始产生强度所需的时间，如图3.3所示。为使水泥混凝土和砂浆有充分的时间进行搅拌、运输、浇捣和砌筑，水泥初凝时间不能过短。当施工完成，则要求尽快硬化，具有强度，故终凝时间不能太长。《通用硅酸盐水泥》(GB 175—2007/XG1—2009)中规定，硅酸盐水泥初凝时间不小于45min，终凝时间不大于390min。普通硅酸盐水泥、矿渣硅酸盐水泥、火山灰质硅酸盐水泥、粉煤灰硅酸盐水泥和复合硅酸盐水泥初凝时间不小于45min，终凝时间不大于600min。

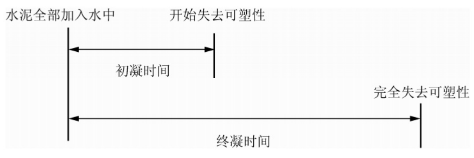


图3.3　水泥凝结时间示意图

2) 安定性

水泥体积安定性简称水泥安定性，是指水泥浆体硬化后体积变化是否均匀的性质。当水泥浆体在硬化过程中或硬化后发生不均匀的体积膨胀，会产生水泥石开裂、翘曲等现象，称为体积安定性不良。体积安定性不良会造成水泥混凝土构件产生膨胀型裂缝，降低建筑物质量，甚至引起严重事故。

体积安定性不良的原因一般是由于熟料中所含的游离氧化钙过多，也可能是由于熟料中所含的游离氧化镁过多或粉磨熟料时掺入的石膏过量。熟料中所含游离氧化钙或氧化镁都是过烧，熟化很慢，在水泥已经硬化后才进行熟化，产生体积膨胀，引起不均匀的体积变化，使水泥石体积开裂。当石膏掺量过多时，在水泥硬化后，它还会继续与固态的水化铝酸钙反应生成水化硫铝酸钙，体积增大约1.5倍，也会引起水泥石开裂。

《通用硅酸盐水泥》中规定用沸煮法检验水泥的体积安定性。水泥净浆试饼沸煮，超过3h后，经肉眼观察未发现裂纹，用直尺检查没有弯曲，则称为体积安定性合格，反之为不合格。沸煮法起加速氧化钙熟化的作用，所以只能检验游离氧化钙所引起的体积安定性不良。游离氧化镁在蒸压下才加速熟化，石膏的危害则需长期在常温下才能发现，二者均不便于快速检验。

《通用硅酸盐水泥》中规定水泥中氧化镁含量不得超过5.0%，如经蒸压安定性试验合格，则水泥中氧化镁的含量允许放宽到6.0%。水泥中三氧化硫的含量不得超过3.5%。体积安定性不良的水泥应作废品处理，不能用于工程中。

特别提示

工程中可采用以下几种简易方法对水泥安定性是否合格进行初步判定。

(1) 合格水泥浇筑的混凝土外表坚硬刺手，而安定性不合格水泥浇筑的混凝土给人以松软、冻后融化的感觉。

(2) 合格水泥浇筑的混凝土多数呈青灰色且有光亮，而安定性不合格水泥浇筑的混凝土多呈白色且黯淡无光。

(3) 合格水泥拌制的混凝土与骨料的握裹力强、黏结牢，石子很难从构件表面剥离下来，而安定性不合格的水泥拌制的混凝土与骨料的握裹力差、黏结力小，石子容易从混凝土的表面剥离下来。

应用案例3-1

某县一机关修建职工住宅楼，共6栋，设计均为7层砖混结构，建筑面积1 000m^2，主体完工后进行墙面抹灰，采用某水泥厂生产的32.5级水泥。抹灰后在两个月内相继发现该工程墙面抹灰出现开裂并迅速发展。开始由墙面一点产生膨胀变形形成不规则的放射状裂缝，多点裂缝相继贯通，成为典型的龟状裂缝，并且空鼓，实际上此时抹灰与墙体已产生剥离。后经查证，该工程所用水泥中氧化镁含量严重超标，致使水泥安定性不合格，施工单位未对水泥进行进场检验就直接使用，因此产生大面积的空鼓开裂。最后该工程墙面抹灰全面返工，造成严重的经济损失。

应用案例3-2

某高层大厦由金海房地产发展有限公司开发，由市第一建筑安装工程总公司承包施工，市建筑设计院设计。整座大楼为现浇钢筋混凝土剪力墙体系，结构层数地下1层、地面以上20层，总建筑面积21 280m^2，混凝土设计强度等级为C30，工程于1995年2月日开工。1995年10月28日～11月8日，在施工第11～14层主体结构中，使用了安定性不合格的水泥，造成了重大质量事故。

1995年9月8日在建设单位召开的协调会上，施工单位提出，因气温下降，为确保工程年底结构封顶，加快施工进度，将原先使用的矿渣水泥改为普通水泥。经协商同意将矿渣水泥改为普通硅酸盐水泥，水泥由建设单位提供。建设单位确定供应商为该市商务实业公司庄木建材公司，供应商确定采用附近某县供电局水泥厂生产的电力牌42.5级普通硅酸盐水泥。

1995年10月15日，供应商在还未与厂方签订购销合同情况下，就进场第一批无质保书电力牌水泥20t，经锦湖区检测中心检测，于1995年10月25日确认安定性合格，1995年10月18日在第一批进场水泥检测报告还未出来时，供应商已与厂方签订了购销合同，购电力牌42.5级普通硅酸盐水泥2 000t。

从1995年10月25日起，供应商开始陆续大批量供应水泥，至11月25日，先后供应水泥658.25t，在此期间，施工单位在10月28日和11月6日先后两次收到供应商提供的编号为F98的质保书。从开始使用第一批20t水泥至11月8日止，用于该工程第11～14层电力牌42.5级普通硅酸盐水泥共540.68t。在此期间，供应商和建设单位均称进场的水泥为同批水泥，未进行复试而大量使用。11月10日当水泥供应到454.75t，主体结构已施工到第13层时，施工单位才从现场取样送区检测中心复试，11月14日区检测中心检测发现送检的水泥安定性不合格，即通知施工单位禁止使用。建设单位、施工单位得知后，17日、19日先后两次将水泥送区检测中心再次复试仍判为安定性不合格，甲、乙方先后又将水泥取样送外市建筑科学研究院，某大学进行复验，结论均为不合格，外市技术监督局于1995年12月4日出具仲裁结论，该水泥为不合格水泥，禁止使用。但工程施工到第14层墙体才停止施工。

3) 强度

水泥强度是表示水泥力学性能的一项重要指标，是评定水泥强度等级的依据。根据《通用硅酸盐水泥》规定，通用硅酸盐水泥的各等级、各龄期强度见表3-8。通用硅酸盐水泥依据其3d的不同强度分为普通型和早强型两种类型，其中有代号为R者为早强型水泥。各龄期强度指标全部满足规定值者为合格，否则为不合格。

根据《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》(GB/T 17671—1999)规定，检测水泥强度时应将水泥、标准砂和水按质量计以1∶3∶0.5混合，按规定的方法制成40mm×40mm×160mm的标准试件，在标准温度(20±10)℃的水中养护，分别测定其3d和28d的抗折强度和抗压强度，再对照国标相应规定判定其强度等级。

表3-8 通用硅酸盐水泥强度等级要求

品　种	强度等级	抗压强度/MPa		抗折强度/MPa	
		3d	28d	3d	28d
硅酸盐水泥	42.5	≥17.0	≥42.5	≥3.5	≥6.5
	42.5R	≥22.0		≥4.0	
	52.5	≥23.0	≥52.5	≥4.0	≥7.0
	52.5R	≥27.0		≥5.0	
	62.5	≥28.0	≥62.5	≥5.0	≥8.0
	62.5R	≥32.0		≥5.5	

续表

品　种	强度等级	抗压强度/MPa		抗折强度/MPa	
		3d	28d	3d	28d
普通硅酸盐水泥	42.5	≥17.0	≥42.5	≥3.5	≥6.5
	42.5R	≥22.0		≥4.0	
	52.5	≥23.0	≥52.5	≥4.0	≥7.0
	52.5R	≥27.0		≥5.0	
矿渣硅酸盐水泥、火山灰质硅酸盐水泥、粉煤灰硅酸盐水泥、复合硅酸盐水泥	32.5	≥10.0	≥32.5	≥2.5	≥5.5
	32.5R	≥15.0		≥3.5	
	42.5	≥15.0	≥42.5	≥3.5	≥6.5
	42.5R	≥19.0		≥4.0	
	52.5	≥21.0	≥52.5	≥4.0	≥7.0
	52.5R	≥23.0		≥4.5	

4) 细度(选择性指标)

细度是指水泥颗粒的粗细程度，是检定水泥品质的主要指标之一。

水泥细度可用筛析法和比表面积法来检测。筛析法以 80μm 或 45μm 方孔筛的筛余量表示水泥细度；比表面积法用 1kg 水泥所具有的总表面积(m^2)来表示水泥细度(m^2/kg)。为满足工程对水泥性能的要求，《通用硅酸盐水泥》中规定，硅酸盐水泥和普通硅酸盐水泥的细度以比表面积表示，其值应不小于 $300m^2/kg$；矿渣硅酸盐水泥、火山灰质硅酸盐水泥、粉煤灰硅酸盐水泥和复合硅酸盐水泥的细度以筛余表示，其 80μm 方孔筛筛余应不大于10%或 45μm 方孔筛筛余应不大于 30%。

4. 其他指标

1) 标准稠度用水量

由于加水量的多少对水泥的一些技术性质(如凝结时间等)的测定值影响很大，故测定这些性质时，必须在一个规定的稠度下进行。这个规定的稠度称为标准稠度。水泥净浆达到标准稠度时所需的拌和水量称为标准稠度用水量(也称需水量)，以水占水泥质量的百分比表示。硅酸盐水泥的标准稠度用水量一般为 25%～30%。水泥熟料矿物成分不同时，其标准稠度用水量亦有差别。水泥磨得越细，标准稠度用水量越大。水泥标准稠度用水量的测定按照《水泥标准稠度用水量、凝结时间、连安定性检验方法》(GB/T B46—2011)相应规定执行。

2) 密度与堆积密度

在进行混凝土配合比计算和储运水泥时，需要知道水泥的密度和堆积密度。硅酸盐水泥的密度为 $3.0～3.2g/cm^3$，通常采用 $3.1g/cm^3$，堆积密度一般取 $1\,000～1\,600kg/m^3$。

3) 水化热

水泥在水化过程中所放出的热量称为水泥的水化热(kJ/kg)。水泥水化热的大部分是在水化初期(7d 内)放出的，后期放热逐渐减少。

水泥水化热的大小及放热速率，主要决定于水泥熟料的矿物组成及细度等。通常强度等级高的水泥，水化热较大。凡起促凝作用的物质(如 $FeCl_3$)均可提高早期水化热；反之，凡能减慢水化反应的物质(如缓凝剂)，则能降低早期水化热。水泥的这种放热特性，对大体积混凝土建筑物是不利的。由于水化热积聚在混凝土内部不易散发，内部温度常上升到50℃甚至更高，内外温差所引起的应力使混凝土结构开裂。因此，大体积混凝土工程应采用水化热较低的水泥。

特别提示

《通用硅酸盐水泥》中规定，水泥出厂检验的指标包括化学指标和物理指标(即凝结时间、安定性和强度)。水泥的检验结果中上述任一项指标不符合相应标准规定技术要求，该水泥即判定为不合格水泥。水泥的碱含量和细度两项技术指标属于选择性指标，并非必检项目。而水泥的标准稠度用水量和水化热等技术指标反映水泥技术特性，国标中并不对其作具体规定。

3.2.5 通用硅酸盐水泥的腐蚀

水泥硬化后，在通常使用条件下耐久性较好。但是，在某些介质中，水泥石中的各种水化产物会与介质发生各种物理化学作用，导致混凝土强度降低，甚至遭到破坏，这种现象称为水泥的腐蚀。

1. 常见腐蚀现象

1) 软水侵蚀(溶出性侵蚀)

水泥是水硬性胶凝材料，有足够的抗水能力。但当水泥石长期与软水相接触时，其中一些水化物将按照溶解度的大小，依次逐渐被水溶解。在各种水化物中，氢氧化钙的溶解度最大，所以首先被溶解。如在静水及无水压的情况下，由于周围的水迅速被溶出的氢氧化钙饱和，溶出作用很快终止，所以溶出仅限于表面，影响不大。但在流动水中，特别是在有水压作用而且水泥石的渗透性又较大的情况下，水流不断将氢氧化钙溶出并带走，降低了周围氢氧化钙的浓度。随着氢氧化钙浓度的降低，其他水化产物如水化硅酸钙、水化铝酸钙等，亦将发生分解使水泥石结构遭到破坏，强度不断降低，最后引起整个建筑物的破坏。当环境水的水质较硬，即水中重碳酸盐含量较高时，可与水泥石中的氢氧化钙起作用，生成几乎不溶于水的碳酸钙，反应如下。

$$Ca(OH)_2 + \underset{\text{重碳酸钙}}{Ca(HCO_3)_2} = 2CaCO_3 + 2H_2O$$

生成的碳酸钙积聚在水泥石的孔隙内，形成密实的保护层，阻止介质水的渗入，所以，水的硬度越高，对水泥腐蚀越小。

2) 硫酸盐腐蚀

在一般的河水和湖水中，硫酸盐含量不多。但在海水、盐沼水、地下水及某些工业污水中常含有钠、钾、铵等硫酸盐，它们与水泥石中的水化产物发生持续反应，生成水化硫铝酸钙。而水化硫铝酸钙含有大量结晶水，其体积比原有体积增加 1.5 倍，由于是在已经固化的水泥石中发生的，因此，对水泥石产生巨大的破坏作用。水化硫铝酸钙呈针状结晶，故常称为“水泥杆菌”。

3) 镁盐腐蚀

在海水及地下水中常含有大量镁盐，主要是硫酸镁及氯化镁。它们与水泥石中的氢氧化钙作用产生的氢氧化镁松软而无胶结能力，氯化钙易溶于水，生成的二水石膏则引起硫酸盐的连锁破坏作用。

4) 酸的腐蚀

(1) 碳酸腐蚀：在工业污水和地下水中，常溶有较多的 CO_2，CO_2 与水泥石中的 $Ca(OH)_2$ 反应生成 $CaCO_3$，$CaCO_3$ 继续与 CO_2 反应，生成易溶于水中的重碳酸钙。

随着 $Ca(OH)_2$ 浓度的降低，还会导致水泥中其他水化物的分解，使腐蚀进一步加剧。

(2) 一般酸的腐蚀：在工业废水、地下水、沼泽水中常含有无机酸和有机酸。它们与水泥石中的氢氧化钙作用后生成的化合物，或溶于水，或体积膨胀，而导致破坏。

此外，强碱(如氢氧化钠)也可导致水泥石的膨胀破坏。

2. 水泥石腐蚀的防止

水泥石的腐蚀过程是一个复杂的物理化学过程，它在遭受腐蚀作用时往往是几种腐蚀同时存在，互相影响。发生水泥石腐蚀的基本原因：一是水泥石中存在引起腐蚀的成分 $Ca(OH)_2$ 和水化铝酸钙；二是水泥石本身不密实，有很多毛细孔通道，侵蚀性介质容易进入其内部；三是周围环境存在腐蚀介质的影响。

根据对以上腐蚀原因的分析，可采取下列防止措施。

(1) 根据侵蚀环境的特点，合理选用水泥品种。

(2) 提高水泥石的密实度，减少侵蚀介质渗透作用。

(3) 在水泥石(混凝土)表面加做保护层，如沥青防水层、水玻璃涂层、耐酸石料(陶瓷)等。

3.2.6 六大通用水泥的性能特点及应用

不同类别的通用水泥特性及应用范围各不相同，在选用时应特别注意，六大通用水泥的特性及应用范围见表 3-9。

表 3-9 六大通用水泥的特性及应用范围

名 称	特 性	适用范围	不适用范围
硅酸盐水泥	早期强度高；水化热较高；抗冻性较好；耐蚀性差；干缩较小	一般土建工程中钢筋混凝土及预应力钢筋混凝土结构；受反复冰冻作用的结构；配制高强混凝土	大体积混凝土结构；受化学及海水侵蚀的工程
普通硅酸盐水泥	与硅酸盐水泥基本相同	与硅酸盐水泥基本相同	与硅酸盐水泥基本相同
矿渣硅酸盐水泥	早期强度较低，后期强度增长较快；水化热较低；耐热性好；耐蚀性较强；抗冻性差；干缩性较大；泌水较多	高温车间和有耐热耐火要求的混凝土结构；大体积混凝土结构；蒸汽养护的构件；有抗硫酸盐侵蚀要求的工程	早期强度要求高的工程；有抗冻要求的混凝土工程
火山灰质硅酸盐水泥	早期强度较低，后期强度增长较快；水化热较低；耐蚀性较强；抗渗性好；抗冻性差；干缩性大	地下、水中大体积混凝土结构和有抗渗要求混凝土结构；蒸汽养护的构件；有抗硫酸盐侵蚀要求的工程	处在干燥环境中的混凝土工程；其他同矿渣水泥

续表

名　　称	特　　性	适用范围	不适用范围
粉煤灰硅酸盐水泥	早期强度较低，后期强度才长较快；水化热较低；耐蚀性较强；干缩性较小；抗裂性较高；抗冻性差	地上、地下及水中大体积混凝土结构；蒸汽养护构件；抗裂性要求较高的构件；有抗硫酸盐侵蚀要求的工程	有抗碳化要求的工程；其他同矿渣水泥
复合硅酸盐水泥	与所掺混合材料的种类、掺量有关，其特性基本与矿渣水泥、火山灰水泥、粉煤灰水泥特性相似	厚大体积的混凝土；普通气候环境中的混凝土；在高湿度环境中或永远处于水下的混凝土	要求快硬的混凝土；严寒地区处于水位升降范围内的混凝土

3.2.7　水泥的包装、标志、运输与储存

1. 包装

水泥可以散装或袋装，袋装水泥每袋净含量为50kg，且应不少于标志质量的99%；随机抽取20袋总重量(含包装袋)应不少于1 000kg。其他包装形式由供需双方协商确定，但有关袋装质量要求应符合上述规定。水泥包装袋应符合《水泥包装袋》(GB 9774—2010)的规定。

2. 标志

水泥包装袋上应清楚标明：执行标准、水泥品种、代号、强度等级、生产者名称、生产许可证标志(QS)及编号、出厂编号、包装日期、净含量。包装袋两侧应根据水泥的品种采用不同颜色印刷水泥名称和强度等级；硅酸盐水泥和普通硅酸盐水泥采用红色；矿渣硅酸盐水泥采用绿色；火山灰质硅酸盐水泥、粉煤灰硅酸盐水泥和复合硅酸盐水泥采用黑色或蓝色。散装发运时应提交与袋装标志相同内容的卡片。

3. 运输与储存

水泥在运输与储存时不得受潮和混入杂物，不同品种和强度等级的水泥在储运中避免混杂。储存期过长，会由于空气中的水汽、二氧化碳作用而降低水泥强度。一般来说，储存3个月后的强度降低10%～20%，所以，水泥存放期一般不超过3个月，应做到先到的水泥先用。快硬水泥、铝酸盐水泥的规定储存期限更短(1～2个月)。过期水泥使用时必须经过试验，并按试验重新确定的强度等级使用。水泥运输和储存时应保持干燥。对袋装水泥，地面垫板要高出地面30cm，四周离墙30cm，堆放高度一般不超过10袋；存放散装水泥时，应将水泥储存于专用的水泥罐(筒仓)中。

知识链接

散装水泥简介

1. 概念

散装水泥是相对于袋装水泥而言的。它是指水泥从工厂生产出来之后，不用任何小包装，直接通过专用设备或容器，从工厂运输到中转站或用户手中。

2. 散装水泥基本特征

(1) 水泥从生产厂直接运输到用户手中，或者经过中转站再运到用户手中，都不使用纸袋或其他任何材料的小包装，只能使用专用运输工具，如专用车、船或集装箱、集装袋，并且以水泥的自然状态进行储存。

(2) 散装水泥从工厂库内出料、计量、装车、卸车等全过程都可以实现机械化或自动化操作，不需要大量的人工劳动。

(3) 散装水泥从出厂到使用，在流通环节中无论经过多少次倒运，水泥始终都在密闭的容器中，不易受到大气环境(如刮风下雨)的影响，因而水泥的质量有保证。与同期生产出来的袋装水泥相比，其储存时间长，有利于水泥厂进行均衡销售。

(4) 散装水泥的生产成本比袋装水泥低，同等级的水泥，散装比袋装可降低成本20%左右。

3. 散装水泥主要优点

(1) 发展散装水泥有利于节约资源，提高经济效益。根据国家有关部门统计：每推广使用一万吨散装水泥，社会综合经济效益为64.45万元。其中可节约：优质木材330m^3，以800元/m^3，可节约26.4万元；煤炭78吨，以250元/吨计，可节约1.95万元；电力7.2万kW·h，以0.5元/(kW·h)计，可节约3.6万元；烧碱22吨，以1 600元/吨计，可节约3.5万元；袋装烂包损失500吨，以500元/吨计，可节约25万元；节约人力拆包费、装卸费4万元。

(2) 发展散装水泥有利于促进和提高工程质量。散装水泥在生产过程中对安定性控制非常严格；在运输过程中采用专用运输工具从生产厂(或中转站)直接送用户，渠道正规明确，杜绝了流通环节掺假或以次充好现象；在储存过程中，散装水泥在储存罐达13个月基本不变质，而袋装水泥存放12个月后，强度降低30%～50%，且易受潮、受湿，结块变质；在使用过程中，散装水泥计量准确、无损耗(而袋装水泥损耗率为5%)保证了水泥用量，进而保证了混凝土质量和工程质量。

(3) 发展散装水泥有利于降低噪声污染，改善施工环境，提高劳动效益。袋装水泥从水泥厂包装到工地拆包使用，中间环节多，占用劳动力多，劳动生产效率低下。特别是现场搅拌，噪声污染严重，影响施工周围环境。而发展散装水泥、推广预拌混凝土(商品混凝土)，能有效提高效率，减轻工作强度，大大降低噪声污染，改善施工环境和工人劳动条件，有利于健康。

(4) 发展散装水泥有利于减少粉尘，改善大气环境质量和二氧化硫的排放。目前，我国主要城市的大气污染正处于转型时期，大气污染从煤烟型转向混合型，建筑施工扬尘对大气污染的比重超过50%，其中水泥尘占很大比例。水泥尘污染大气的途径主要有两方面：一是在袋装水泥运输过程中以及装卸和储存过程中产生的破损，一般破损率在5%，仅此一项，2002年全国袋装水泥5.3亿吨，破损撒落水泥2 650万吨，而这些水泥中可能有20%以上，约550万吨最终进入大气，成为悬浮物污染环境；二是袋装水泥在拆袋搅拌时产生的粉尘，还有包装物回收时产生的粉尘，都会产生严重的污染，使水泥粉尘进入大气的数量远远大于550万吨，成为危害人们身体健康、污染生态环境的源头。如果采用散装水泥，从水泥厂内装运开始，在运输、储存、使用过程中全部在密闭状况下进行，同时配合预拌混凝土的推广，可以大量减少甚至消除水泥粉尘排放，净化空气，减轻污染。

(5) 发展散装水泥有利于维护生态平衡，具有显著生态效益。

2002年全国袋装水泥5.3亿吨，消耗包装水泥袋用纸318万吨，折合优质木材1 749万立方米，相当于全国木材总伐量的1/5，约毁掉36万公顷森林。我国许多地区发生的沙尘暴就与植被减少、水土流失、荒漠化严重有着直接的关系。



4. 我国散装水泥发展现状

经过多年的发展，我国专业化的散装水泥产、运、贮、用等环节构成的产业和技术链已初具规模，并且逐步形成了散装水泥、预拌混凝土、预拌砂浆“三位一体”的散装水泥发展格局。2008 年，全国散装水泥供应量已达到 6.36 亿吨，全国水泥平均散装率达到 45.82%，但这与平均 70%的散装化要求和发达国家 90%以上的散装化水平相比差距明显。我国 2009 年上半年散装水泥供应量为 32 546.64 万吨，据测算，与完全袋装相比相当于节约综合资源折标煤 747.79 万吨，减少粉尘排放量 327.09 万吨、二氧化碳排放量 1 944.27 万吨、二氧化硫排放量 6.36 万吨，产生直接经济效益达 146.46 亿元。

3.2.8 专用水泥

专用水泥是指专门用途的水泥，如道路硅酸盐水泥、油井水泥、白色水泥、彩色水泥。

1. 道路硅酸盐水泥

由较高铁铝酸钙含量的硅酸盐道路水泥熟料、0～10%活性混合材料和适量石膏磨细制成的水硬性胶凝材料称为道路硅酸盐水泥(简称道路水泥)。对道路水泥的性能要求是：耐磨性好、收缩小、抗冻性好、抗冲击性好，有高的抗折强度和良好的耐久性。道路水泥的上述特性主要依靠改变水泥熟料的矿物组成、粉磨细度、石膏加入量及外加剂来达到。

2. 油井水泥

油井水泥专用于油井、气井地固井工程，又称堵塞水泥。它的主要作用是将套管与周围的岩层胶结封固，封隔地层内油、气、水，防止互相窜扰，以便在井内形成一条从油层流向地面，隔绝良好的油流通道。

3. 装饰水泥

装饰水泥指白色水泥和彩色水泥。在水泥生料中加入少量金属氧化物着色剂直接烧成彩色熟料，也可制得彩色水泥。

白色硅酸盐水泥的组成、性质与硅酸盐水泥基本相同，所不同的是在配料和生产过程中严格控制着色氧化物(Fe_2O_3、MnO_2、Cr_2O_3、TiO_2 等)的含量。彩色硅酸盐水泥简称彩色水泥。它是用白水泥熟料、适量石膏和耐碱矿物颜料共同磨细而制成的。白水泥和彩色水泥广泛地应用于建筑装修中，如制作彩色水磨石、饰面砖、锦砖、玻璃马赛克，以及制作水刷石、斩假石、水泥花砖等。

3.2.9 特性水泥

特性水泥是指某种性能比较突出的水泥，如快硬硅酸盐水泥、膨胀水泥。

1. 中热水泥和低热矿渣水泥

中热硅酸盐水泥和低热矿渣硅酸盐水泥的主要特点为水化热低，适用于大坝和大体积混凝土工程。

中热硅酸盐水泥是由适当成分的硅酸盐水泥熟料加入适量石膏磨细而成的、具有中等水化热的水硬性胶凝材料，简称中热水泥。

低热矿渣硅酸盐水泥是由适当成分的硅酸盐水泥熟料加入矿渣和适量石膏磨细而成的具有低水化热的水硬性胶凝材料，简称低热矿渣水泥。其矿渣掺量为水泥质量的 20%～60%，允许用不超过混合材总量 50%的磷渣或粉煤灰代替矿渣。

2. 快硬水泥

1) 快硬硅酸盐水泥

凡以硅酸盐水泥熟料和石膏磨细制成，以 3d 抗压强度表示标号的水硬性胶凝材料，称为快硬硅酸盐水泥(简称快硬水泥)。快硬硅酸盐水泥生产方法与硅酸盐水泥基本相同，只是要求 C_3S 和 C_3A 含量高些。快硬硅酸盐水泥水化放热速率快，水化热较高，早期强度高，但干缩率较大。主要用于抢修工程、军事工程、预应力钢筋混凝土构件，适用于配制干硬混凝土，水灰比可控制在 0.40 以下。

2) 快硬硫铝酸盐水泥

凡以适当成分的生料经煅烧所得，以无水硫铝酸钙和硅酸二钙为主要矿物，加入适量石膏磨细制成的早期强度高的水硬性胶凝材料，称为快硬硫铝酸盐水泥。快硬硫铝酸盐水泥的主要矿物为无水硫铝酸钙和 β- C_2S。

快硬水泥可用来配制早强、高等级的混凝土及紧急抢修工程以及冬季施工和混凝土预制构件，但不能用于大体积混凝土工程及经常与腐蚀介质接触的混凝土工程。

3. 抗硫酸盐水泥

按抗硫酸盐侵蚀程度，分为中抗硫酸盐硅酸盐水泥和高抗硫酸盐硅酸盐水泥两类。以适当成分的硅酸盐水泥熟料，加入适量石膏磨细制成的，具有抵抗中等浓度硫酸根离子侵蚀的水硬性胶凝材料，称为中抗硫酸盐硅酸盐水泥(简称中抗硫水泥)，代号 P.MSR。以适当成分的硅酸盐水泥熟料，加入适量石膏磨细制成的、具有抵抗较高浓度硫酸根离子侵蚀的水硬性胶凝材料，称为高抗硫酸盐硅酸盐水泥(简称高抗硫水泥)，代号 P·HSR。

抗硫酸盐水泥适用于一般受硫酸盐侵蚀的海港、水利、地下、隧涵、道路和桥梁基础等工程设施。

4. 膨胀水泥

通用水泥在空气中硬化时会收缩，导致混凝土产生裂缝，使一系列性能变坏。膨胀水泥可克服通用水泥混凝土的这一缺点。膨胀水泥的种类有：硅酸盐膨胀水泥、铝酸盐膨胀水泥、硫铝酸盐膨胀水泥、铁铝酸钙膨胀水泥。

膨胀水泥的膨胀是由于水泥石中形成了钙矾石。通过调整各组分比例，即可得到不同膨胀值的膨胀水泥。膨胀水泥主要用于配制收缩补偿混凝土、构件接缝及管道接头、混凝土结构的加固和修补、防渗堵漏工程、机器底座和地脚螺栓固定。

本任务小结

本任务重点介绍了工程中常用的胶凝材料。

气硬性胶凝材料和水硬性胶凝材料是胶凝材料中的两种类型。二者硬化条件不同，适用范围不同，在使用时应注意合理选择。

生石灰熟化时要放出大量的热量，且体积膨胀，故必须充分熟化后方可使用，否则会影响施工质量。石灰浆体具有良好的可塑性和保水性，硬化慢、强度低，硬化时收缩大，所以不宜单独使用；主要用于配制砂浆、拌制灰土和三合土以及生产硅酸盐制品。石灰在储运过程中要注意防潮，且储存时间不宜过长。建筑石膏凝结硬化快，硬化体孔隙率大，属多孔结构材料。其成本低、质量轻，有良好的保温隔热、隔声吸声效果，有较好的防火性及一定范围内的温度、湿度调节能力，是一种具有节能意义和发展前途的新型轻质墙体材料和室内装饰材料。水玻璃常用于加固地基、涂刷或浸渍制品；配制耐酸、耐热砂浆或混凝土；用于堵塞漏洞、填缝和局部抢修等。

水泥是本课程的重点内容之一，它是水泥混凝土最重要的组成材料。本章主要讨论了通用硅酸盐的6种常用水泥，对特性水泥和专用水泥作了简单介绍。

通用硅酸盐水泥的矿物成分有4种，矿物组成不同，水泥性质会有很大差异。硅酸盐水泥的技术性质包括密度与堆积密度、细度、标准稠度用水量、凝结时间、体积安定性、强度、水化热、不溶物和烧失量、碱含量等。硅酸盐水泥储存应分别存放，并注意防潮，不宜久存。硅酸盐水泥如使用不当，会受到腐蚀，腐蚀种类有软水腐蚀、盐类腐蚀、酸类腐蚀和强碱腐蚀等，防止水泥石腐蚀的方法有3种：合理选用水泥品种、提高水泥石密实度、制作保护层。

与硅酸盐水泥相比，掺混合材料的通用硅酸盐水泥具有早期强度低(但后期强度增长较快)、水化热小、抗腐蚀性强、对温湿度比较敏感等特点。通用硅酸盐水泥性能特点各异，适用于不同要求的混凝土和钢筋混凝土工程。

特性水泥和专用水泥适用场合与水泥特点密切相关。

习题

一、填空题

1．石灰的特性有：可塑性__________、硬化速度__________、硬化时体积__________和耐水性__________等。

2．建筑石膏具有以下特性：凝结硬化__________、孔隙率__________、强度__________、凝结硬化时体积__________、防火性能__________等。

3．生石灰的熟化是指__________，熟化过程的特点：一是__________；二是__________。

4．水玻璃的特性是__________、__________和__________。

二、简答题

1．简述气硬性胶凝材料和水硬性胶凝材料的区别。

2．为什么说建筑石膏制品是一种较好的室内装饰材料？

3．生石灰在熟化时为什么需要陈伏两周以上？为什么在陈伏时需在熟石灰表面保留一层水？

4．石灰的用途如何？在贮存和保管时需要注意哪些方面？

5．水玻璃的用途有哪些？

6．试分析硅酸盐水泥、普通水泥、矿渣水泥、火山灰水泥及粉煤灰水泥性质的异同点，并说明产生差异的原因。

7．仓库内存有 3 种白色胶凝材料，它们是生石灰粉、建筑石膏和水泥，有什么简便方法可以辨认？

8．下列混凝土工程中，应优先选用哪种水泥？不宜选用哪种水泥？

(1) 干燥环境的混凝土。

(2) 湿热养护的混凝土。

(3) 厚大体积的混凝土。

(4) 水下工程的混凝土。

(5) 60MPa 的混凝土。

(6) 热工窑炉的混凝土。

(7) 路面工程的混凝土。

(8) 冬季施工的混凝土。

(9) 严寒地区水位升降范围内的混凝土。

(10) 水闸门等有抗渗要求的混凝土。

(11) 经常与流动淡水接触的混凝土。

(12) 经常受硫酸盐腐蚀的混凝土。

(13) 紧急抢修工程。

(14) 修补建筑物裂缝。

三、案例题

1．以下是 A、B 两种硅酸盐水泥熟料矿物组成百分比含量，分析 A、B 两种硅酸盐水泥的早期强度及水化热的差别，见表 3-10。

表 3-10 案例题 1—矿物组成表

矿物组成	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
A 水泥	60%	15%	16%	9%
B 水泥	47%	28%	10%	15%

2．某大体积的混凝土工程，浇注两周后拆模，发现挡墙有多道贯穿型的纵向裂缝。该工程使用某立窑水泥厂生产 42.5 P·II 型硅酸盐水泥，其熟料矿物组分见表 3-11，分析裂缝产生的主要原因。

表 3-11 案例题 2—矿物组成表

矿物组成	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
含量	61%	14%	14%	11%

3．某工地使用某厂生产的硅酸盐水泥，加水拌和后，水泥浆体在短时间内迅速凝结。后经剧烈搅拌，水泥浆体又恢复塑性，随后过 3h 才凝结。试讨论形成这种现象的原因。

学习任务 4

混　凝　土

学习目标

本章是课程重点之一，主要讲述普通混凝土的组成、技术性质、配合比设计和质量控制，并简单介绍了轻骨料混凝土及其他品种的混凝土。通过学习本章，应达到以下目标。

(1) 掌握普通混凝土的组成及其原材料的质量控制。

(2) 掌握普通混凝土的主要技术性质：和易性、强度、变形和耐久性。

(3) 了解混凝土外加剂的性能特点及使用注意事项。

(4) 熟悉普通混凝土的配合比设计程序。

(5) 了解普通混凝土的质量控制。

(6) 了解其他品种混凝土的特点及应用。

学习要求

能力目标	知识要点	权重
了解普通混凝土的组成材料特点，能合理选用材料	普通混凝土的组成材料	15%
掌握普通混凝土的和易性、强度、变形、耐久性	普通混凝土的和易性	20%
	普通混凝土的强度	20%
	普通混凝土的变形性	5%
	普通混凝土的耐久性	10%
熟悉混凝土配合比设计	混凝土配合比设计程序	10%
了解混凝土的质量控制	混凝土的质量控制主要指标和程序	10%
了解高性能混凝土等其他混凝土主要特点	高性能混凝土等其他混凝土的主要特点及应用	10%

任 务 导 读

混凝土简称为“砼”，是指由胶凝材料将集料胶结成整体的工程复合材料的统称。它是由胶结材料，集料、骨料和水按一定比例配制，经搅拌振捣成型，在一定条件下养护而成的人造石材。混凝土具有原料丰富、价格低廉、生产工艺简单的特点，因而使其用量越来越大；同时混凝土还具有抗压强度高、耐久性好、强度等级范围宽的特点，使其使用范围十分广泛，不仅在各种土木工程中使用，而且在造船业、机械工业、海洋的开发、地热工程中，混凝土也是重要的材料(图 4.1)。



(a) 品种多样的混凝土



(b) 施工后养护的混凝土



(c) 混凝土搅拌运输车



(d) 混凝土设备

图 4.1 混凝土及相关机械设备



混凝土的发展

混凝土可以追溯到古老的年代，其所用的胶凝材料为黏土、石灰、石膏、火山灰等。从 19 世纪 20 年代出现了波特兰水泥后，由于用它配制成的混凝土具有工程所需要的强度和耐久性，而且原料易得，造价较低，特别是能耗较低，因而用途极为广泛(见无机胶凝材料)。20 世纪初期，有人发表了水胶比等学说，初步奠定了混凝土强度的理论基础。以后，相继出现了轻集料



混凝土、加气混凝土及其他混凝土，各种混凝土外加剂也开始使用。60年代以来，广泛应用减水剂，并出现了高效减水剂和相应的流态混凝土；高分子材料进入混凝土材料领域，出现了聚合物混凝土；多种纤维被用于分散配筋的纤维混凝土。现代测试技术也越来越多地应用于混凝土材料科学的研究。



引　例

2010年1月12日16时53分(北京时间13日5时53分)海地发生里氏7.0级地震，首都太子港及全国大部分地区受灾情况严重，截至2010年1月26日，世界卫生组织确认，此次海地地震已造成11.3万人丧生，19.6万人受伤。此次地震中遇难者有联合国驻海地维和部队人员，其中包括8名中国维和人员。

而据法国一个建筑工程师组织表示，海地首都太子港在地震中遭遇如此大规模灾难的原因之一就是建筑质量不过关。海地地震发生之后，该建筑专家组经考察发现当地大量建筑为“豆腐渣”工程，钢筋混凝土的质量令人担忧。法国非政府组织“应急建筑工程师基金会”建筑师帕特里克·库隆贝尔和塞尔日·古诺在震后考察时也同样认为，海地不仅建筑材料质量差，盖楼时也有偷工减料之嫌。“人们为省钱，使用劣质钢筋、不足量的水泥和混凝土，这些建筑使用的螺纹钢筋强度很低甚至可以用手把它折弯，如图4.2所示。另外，它们表面过于光滑。从混凝土角度来看，水泥调配比例不当，导致混凝土质量不过关。”这些专家所说的表明了一个观点，就是此次“天灾”所造成的很大一部分损失则是由“人祸”所为，而该“人祸”的起因就是因使用不合格的混凝土所建造的房屋建筑。



图4.2　海地地震中破裂的混凝土

4.1　混凝土概述

4.1.1　混凝土的概念及特点

混凝土是指由胶凝材料、粗细骨(集)料、水(有时还加入外加剂和外掺材料)配合拌制而成的并具有一定强度的人造石材。混凝土的胶凝材料多用水泥，也可以使用其他胶结材料，如沥青、石膏、水玻璃、聚合物树脂等。自1850年出现第一批钢筋混凝土以来，混凝土已

发展成为当今世界用量最大、用途最广的工程材料。随着材料技术和施工技术的不断发展，混凝土的发展前景十分广阔。

混凝土有着十分显著的优点，包括以下几方面。

(1) 良好的可浇筑性。可浇筑成各种形状和尺寸的制品及结构物。

(2) 性能的多样性。可通过改变混凝土组成成分及其数量比例，获得具有不同物理力学性能的产品。

(3) 良好的耐久性和经济性。混凝土经久耐用，原材料来源广泛，成本低廉。

(4) 水泥混凝土与钢筋可牢固黏结，制得力学、耐久性能俱佳的钢筋混凝土与预应力钢筋混凝土。

(5) 具有一定的美学特性。经过表面处理，可获得不同的质感与装饰效果。

混凝土同样也存在一些缺点，包括以下几个方面。

(1) 脆性大、延性低、易开裂、抗拉强度小，一般混凝土不单独使用，与钢筋共同工作形成钢筋混凝土。

(2) 自重大、比强度(强度与表观密度之比)低，施工时对于支撑要牢固，必要时必须经过验算。

(3) 对环境因素敏感，需较长时间保证养护条件，需要保证混凝土表面保持湿润，并且在天气寒冷时，要保证混凝土的入模温度不低于 5℃。

特别提示

鉴于混凝土自重大、易开裂和抗拉强度小的特点，在针对跨度 4m 以上的混凝土现浇梁施工支设模板时，要求起拱范围为 1/1 000～3/1 000。

4.1.2　混凝土的结构

水泥混凝土硬化后(即混凝土石)的结构如图 4.3 所示。其中，砂、石起骨架作用，水泥与水形成的水泥浆填充在砂石骨架空隙之中，并将砂、石包裹起来。水泥浆凝结硬化前，赋予混凝土拌和物一定的流动性，水泥浆硬化后，将砂、石胶结为一个整体。

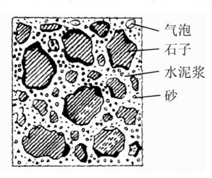


图 4.3　水泥混凝土硬化后结构

4.1.3　混凝土的分类

混凝土按照表观密度分为以下几种。

1) 重混凝土

表观密度大于 2 800kg/m^3，采用表观密度较大的骨料配制而得，如重晶石、铁矿石等。

此类混凝土对X射线、R射线有较高的屏蔽能力，适用于人防、军事、防辐射工程。

2) 普通混凝土

表观密度为2 000～2 800kg/m^3，采用天然砂、石作骨料配制而成，广泛用于各类土木工程，本任务主要讨论此类混凝土。

3) 轻混凝土

表观密度小于2 000kg/m^3，包括轻骨料混凝土、多孔混凝土和无砂大孔混凝土，此类混凝土多用于有保温、隔热要求的部位，强度等级高的轻骨料混凝土也可用于承重结构。

混凝土还可按照其功能及用途分类，如结构混凝土、防水混凝土、耐热混凝土、耐酸混凝土、道路混凝土、大体积混凝土、防辐射混凝土等；按照生产和施工方式分类，如泵送混凝土、预拌(商品)混凝土、喷射混凝土、真空脱水混凝土、离心混凝土、碾压混凝土、压力灌浆混凝土等。

4.2 普通混凝土用骨料


引 例

某住宅楼在建成仅3个月时出现屋面开裂，后发展至局部垮塌。经调查，事故的主要原因之一是该楼进深梁混凝土强度过低。该梁设计强度等级为C30，但施工中未按规定预留试件，事故后鉴定混凝土强度仅达到C15等级要求。在梁的断口处可以清楚看到砂石未洗净，骨料中混杂有部分黏土块、石灰颗粒和树叶等杂质；同时，该梁混凝土采用了当地生产的42.5级普通硅酸盐水泥，事故后经鉴定水泥实测强度仅达到35MPa左右。

普通混凝土所用骨料按照粒径大小分为两种：粒径大于4.75mm的称为粗骨料，即石子；粒径小于4.75mm的称为细骨料，即砂。

普通混凝土用细骨料包括天然砂和机制砂。天然砂是自然生成的，经人工开采和筛分的粒径小于4.75mm的岩石颗粒，根据来源不同包括河砂、湖砂、山砂、淡化海砂，但不包括软质、风化的岩石颗粒。其中河砂颗粒表面比较圆滑、洁净，且产源广泛，在建筑工程中应用最为广泛。机制砂系指经除土处理，由机械破碎、筛分制成的粒径小于4.75mm的岩石、矿山尾矿或工业废渣颗粒，同样不包括软质、风化的颗粒。机制砂颗粒尖锐、有棱角、较洁净，但片状颗粒及细粉含量较多、成本较高。普通混凝土用粗集料有碎石和卵石两种，其中碎石应用较多。

混凝土用骨料的表观密度不小于2 500kg/m^3，松散堆积密度不小于1 350kg/m^3，空隙率不大于47%。

根据国标《建设用砂》(GB/T 14684—2011)、《建设用卵石、碎石》(GB/T 14685—2011)。的规定，砂、石按技术要求分为Ⅰ类、Ⅱ类、Ⅲ类3种类别。Ⅰ类宜用于强度等级大于C60的混凝土；Ⅱ类宜用于强度等级为C30～C60及抗冻、抗渗或其他要求的混凝土；Ⅲ类宜用于强度等级小于C30的混凝土或建筑砂浆。

混凝土中粗、细骨料的总体积一般占混凝土体积的60%～80%，骨料质量的优劣将直接影响到混凝土各项性质的好坏。下面概括性地介绍对普通混凝土用砂、石的技术质量要求。

1. 泥和泥块含量

含泥量是指骨料中粒径小于75μm 颗粒的含量。泥块含量在细骨料中是指粒径大于1.18mm，经水洗、手捏后变成小于600μm 的颗粒的含量；在粗骨料中则是指粒径大于4.75mm，经水洗、手捏后变成小于2.36mm 的颗粒的含量。

骨料中的泥颗粒极细，会粘附在骨料表面，影响水泥石与骨料之间的胶结能力。而泥块会在混凝土中形成薄弱部分，对混凝土的质量影响更大。据此，对骨料中泥和泥块含量必须严加限制，如国标规定混凝土强度等级在C30或以上时，其砂、石中含泥量分别不得超过3.0%和1.0%。

2. 有害物质含量

混凝土用的粗、细骨料中不应混有草根、树叶、树枝、塑料、炉渣、煤块等杂物，并且骨料中硫化物、硫酸盐和有机物等的含量要符合建设用砂、石国标的相应骨料中有害物质含量限值的规定。对于砂，除了上面两项外，还有云母、轻物质(指密度小于2 000kg/m^{3}的物质)含量也须符合国标相应规定。如果是海砂，还应考虑氯盐含量。

知识链接

海砂危楼

2013年3月13日，央视315曝光了深圳海砂危楼。深圳曝出居民楼房楼板开裂、墙体裂缝等问题，每逢雨天渗水不止。而根据深圳市政府的调查结果显示，问题的根源就是建设时使用大量海砂。海砂中超标的氯离子将严重腐蚀建筑中的钢筋，甚至倒塌。这样的“海砂危楼”在深圳并非个案，因为海砂可以节省一半的成本，所以很多无良心的开发商选择“海砂”做建筑混凝土。氯离子在混凝土里面对于钢筋的锈蚀引起的腐蚀引起结构的裂化，就像人的体内的癌细胞一样。从建筑结构上看，钢筋混凝土结构的裂化，是钢筋混凝土最主要的而且导致钢筋锈蚀比较重要的因素。不符合国家规定的含有超标氯离子的海砂，如果大量存在于建筑中，这个裂变侵蚀钢筋的过程，被专门划分为潜伏期与发展期，经历这两个阶段之后，使用海砂的建筑基本就可以称之为危楼。相比国家规定的50年民用建筑寿命，海砂建筑寿命短了很多。

千万不要轻视这种危害，因为含有氯离子的混凝土，对钢筋起着不间断的化学作用，这种化学作用直接破坏钢筋的保护膜，从而侵蚀钢筋的内部结构，也就是大家常说的钢筋生锈，钢筋一旦持续生锈，就必然会减少原有的支撑力。另外氯离子会使混凝土膨胀，简单地说，就是混凝土会从内部开始开裂，这个过程，消费者在前期是很难察觉的，而到了最后的阶段，大家看到危险的时候，建筑物表面已经出现混凝土的松溃，而整个钢筋混凝土的墙体会直接露出一根根钢筋，混凝土也最终会一点点全面脱离钢筋。而房屋也会失去钢筋的支撑，出现垮塌。

3. 坚固性

恶劣环境条件下混凝土骨料会发生体积变化从而导致混凝土性能劣化，骨料抵抗此种影响的能力成为坚固性。骨料坚固性一般通过硫酸盐安定性方法检测，须达到国标相应规定。

4. 碱活性

骨料中若含有活性成分(如活性氧化硅)，在一定的条件下骨料会与水泥中的碱发生碱-骨料反应，产生膨胀并导致混凝土开裂。因此，当用于重要工程或对骨料有怀疑时，须按标准规定方法对骨料进行碱活性检验。

5. 颗粒级配

骨料的级配是指骨料中不同粒径颗粒的分布情况。良好的级配应当能使骨料的空隙率和总表面积均较小，从而不仅使所需水泥浆量较少，而且还可以提高混凝土的密实度、强度及其他性能。若骨料的粒径分布全在同一尺寸范围内，则会产生很大的空隙率，如图 4.4(a)所示；若骨料的粒径分布在更多的尺寸范围内，则空隙率相应减小，如图 4.4(b)所示；若采用较大的骨料最大粒径，也可以减小空隙率，如图 4.4(c)所示。由此可见，只有适宜的骨料粒径分布，才能达到良好级配的要求。

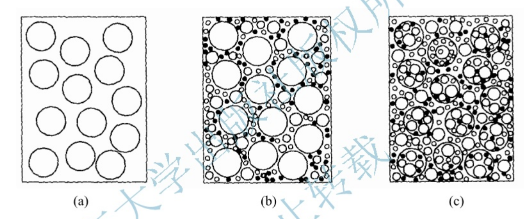


图 4.4　骨料颗粒组合示意图

骨料的粗细程度是指不同粒径的颗粒混合在一起的平均粗细程度。相同质量的骨料，粒径小，总表面积大；粒径大，总表面积小。因而大粒径的骨料所需包裹其表面的水泥浆量就少，即相同的水泥浆量，包裹在大粒径骨料表面的水泥浆层就厚，便能减小骨料间的摩擦。对砂、石的级配要求如下。

1) 砂的颗粒级配和粗细程度

砂的级配和粗细程度用筛分析方法测定。砂的筛分析方法是用一套孔径分别为 9.50mm、4.75mm、2.36mm、1.18mm、600μm、300μm、150μm 的 7 个标准筛，将抽样所得 500g 烘干砂，由粗到细依次过筛，然后称量留在各筛上砂的质量，并计算出各筛上的分计筛余百分率 a_1，a_2，a_3，a_4，a_5，a_6(各筛上的筛余量占砂样总质量的百分率)，及累计筛余百分率 A_1，A_2，A_3，A_4，A_5，A_6(各筛与比该筛粗的所有筛之分计筛余百分率之和)。分计筛余与累计筛余的关系见表 4-1。一组累计筛余(A_1～A_6)表征一种级配。

表 4-1　分计筛余和累计筛余的关系

筛孔尺寸	分计筛余(%)	累计筛余(%)
4.75mm	a_1	$A_1=a_1$
2.36mm	a_2	$A_2=a_1+a_2$

续表

筛孔尺寸	分计筛余(%)	累计筛余(%)
1.18mm	a_3	$A_3=a_1+a_2+a_3$
600μm	a_4	$A_4=a_1+a_2+a_3+a_4$
300μm	a_5	$A_5=a_1+a_2+a_3+a_4+a_5$
150μm	a_6	$A_6=a_1+a_2+a_3+a_4+a_5+a_6$

标准规定，砂按600μm筛孔的累计筛余百分率计，按天然砂和机制砂分别分成3个级配区，见表4-2。砂的实际颗粒级配应符合表4-2，砂的级配类别应符合表4-3的规定。配制普通混凝土时宜优先选用Ⅱ区砂(中砂)；当采用Ⅰ区砂(偏粗砂)时，应提高砂率并保持足够的水泥用量，以满足混凝土的和易性；当采用Ⅲ区砂(偏细砂)时，宜适当降低砂率以保证混凝土强度。

表4-2 砂的颗粒级配

砂的分类	天然砂			机制砂		
级配区	1区	2区	3区	1区	2区	3区
方筛孔	累计筛余(%)					
9.50mm	0	0	0	0	0	0
4.75mm	0～10	0～10	0～10	0～10	0～10	0～10
2.36mm	0～35	0～25	0～15	0～35	0～25	0～15
1.18mm	35～65	10～50	0～25	35～65	10～50	0～25
600μm	71～85	41～70	16～40	71～85	41～70	16～40
300μm	80～95	70～92	55～85	80～95	70～92	55～85
150μm	90～100	90～100	90～100	85～97	80～94	75～94

表4-3 砂的级配类别

类　别	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ
级配区	2区	1、2、3区	

砂的粗细程度用细度模数表示，细度模数(M_x)按下式计算。

$$M_x=[(A_2+A_3+A_4+A_5+A_6)-5A_1]]/(100-A_1) \tag{4-1}$$

细度模数越大，表示砂越粗。普通混凝土用砂的细度模数范围一般为1.6～3.7，其中M_x在3.1～3.7为粗砂，M_x在2.3～3.0为中砂，M_x在1.6～2.2为细砂，配制混凝土时，宜优先选用中砂。M_x在0.7～1.5的砂为特细砂，若用于配制混凝土时，要作特殊考虑。应当注意，砂的细度模数并不能反映其级配的优劣，细度模数相同的砂，级配可以相差很大。所以，配制混凝土时必须同时考虑砂的颗粒级配和细度模数。

2) 石子的颗粒级配和最大粒径

粗骨料的级配有连续级配和单粒级两种。连续级配是按颗粒尺寸由小到大连续分级的，每级骨料都占有一定比例，如天然卵石。连续级配颗粒级差小，颗粒上、下限粒径之比接近，配制的混凝土拌和物和易性好，不易发生离析，目前应用较广泛。单粒级宜用于组合成具有所要求级配的连续粒级，也可与连续粒级配合使用，以改善骨料级配或配成较大粒度的连续粒级。工程中不宜采用单一的单粒级粗骨料配制混凝土。按国家标准规定，普通混凝土用碎石及卵石的颗粒级配见表 4-4。

表 4-4　普通混凝土用碎石及卵石的颗粒级配

级配情况	公称粒级/mm	累计筛余(%)											
		方筛孔径/mm											
		2.36	4.75	9.50	16.0	19.0	26.5	31.5	37.5	53.0	63.0	75.0	90
连续粒级	5～16	95～100	85～100	30～60	0～10	0	—	—	—	—	—	—	—
	5～20	95～100	90～100	40～80	—	0～10	0	—	—	—	—	—	—
	5～25	95～100	90～100	—	30～70	—	0～5	0	—	—	—	—	—
	5～31.5	95～100	95～100	70～90	—	15～45	—	0～5	0	—	—	—	—
	5～40	—	95～100	70～90	—	30～65	—	—	0～5	0	—	—	—
单粒级	5～10	95～100	80～100	0～15	0	—	—	—	—	—	—	—	—
	10～16	—	95～100	80～100	0～15	—	—	—	—	—	—	—	—
	10～20	—	95～100	85～100	—	0～15	0	—	—	—	—	—	—
	16～25	—	—	95～100	55～70	25～40	0～10	—	—	—	—	—	
	16～31.5	—	95～100	—	85～100	—	—	0～10	0	—	—	—	—
	20～40	—	—	95～100	—	85～100	—	—	0～10	0	—	—	—
	40～80	—	—	—	—	95～100	—	—	70～100	—	30～60	0～10	0

石子的级配通过筛分析试验确定，其标准筛为孔径为 2.36mm、4.75mm、9.50mm、16mm、19mm、26.5mm、31.5mm、37.5mm、53.0mm、63.0mm、75.0mm 及 90.0mm 这 12 个方孔筛，确定某种石子级配时可按需要选用不同孔径筛组合后进行筛分，然后计算得出每个筛号的分计筛余百分率和累计筛余百分率(计算方法与砂相同)。碎石和卵石的级配范围要求相同，均应符合表 4-4。

粗骨料中公称粒级的上限称为该骨料的最大粒径。当骨料粒径增大时，其总表面积减小，包裹它表面所需的水泥浆数量相应减少，可节约水泥，或可保持水泥用量不变而提高强度，所以，一般情况下应尽量选择最大粒径较大的粗骨料。但当普通混凝土(尤其是高强度混凝土)骨料的最大粒径过大(超过 40mm)时，混凝土强度的提高被粗骨料与水泥间较少的黏结面积和大粒径骨料造成的骨架不均匀性影响所抵消，反而会对混凝土性能造成负面影响。

特 别 提 示

《混凝土结构工程施工质量验收规范(2010 版)》(GB 50204—2002)规定，混凝土粗骨料的最大粒径不得超过结构截面最小尺寸的 1/4，同时不得大于钢筋间最小净距的 3/4；对于混凝土实

心板，骨料的最大粒径不宜超过板厚的 1/3，且不得超过 40mm；对于泵送混凝土(泵送高度在 50m 以下)，骨料最大粒径与输送管内径之比宜小于或等于 1∶3，卵石宜小于或等于 1∶2.5。

6. 骨料的形状与表面特征

骨料的颗粒形状近似球状或立方体形时，表面积较小，对混凝土拌和物流动性有利。砂的颗粒较小，一般较少考虑其形貌，但石子必须考虑其针状、片状的含量。石子中的针状颗粒是指长度大于该颗粒所属粒级平均粒径(该粒级上、下限粒径的平均值)的 2.4 倍者，而片状颗粒是指其厚度小于平均粒径 0.4 倍者。针状、片状颗粒不仅受力时易折断，而且会增加骨料间的空隙，对针状、片状颗粒含量的限量要求见表 4-5。

表 4-5　卵石和碎石的针状、片状颗粒含量

项　　目	指　　标		
	Ⅰ类	Ⅱ类	Ⅲ类
针、片状颗粒(%)，按质量计	≤5	≤10	≤15

7. 强度

骨料的强度是指粗骨料的强度。为了保证混凝土的强度，粗骨料必须致密并具有足够的强度。碎石的强度可用抗压强度和压碎指标值表示，卵石的强度可用压碎指标值表示。

碎石的抗压强度测定：将其母岩制成边长为 50mm 的立方体(或直径与高均为 50mm 的圆柱体)试件，在水饱和状态下测定其极限抗压强度值。碎石抗压强度一般在混凝土强度等级≥C60 时才检验。通常，要求岩石抗压强度与混凝土强度等级之比不应小于 1.5；同时，火成岩(如花岗石)强度不宜低于 80MPa，变质岩(如石灰岩)强度不宜低于 60MPa，水成岩(如大理岩)强度不宜低于 45MPa。

碎石和卵石的压碎指标值测定：将一定量气干状态的粒径 10～20mm 石子装入标准筒内，按 1kN/s 速度均匀加荷至 200kN 并稳荷 5s，卸荷后称取试样质量为 G_1，再用 2.36mm 孔径的筛筛除被压碎的细粒，称出留在筛上的试样质量为 G_2，按下式计算压碎指标值：

$$Q_c = \frac{G_1 - G_2}{G_1} \times 100\% \tag{4-2}$$

压碎指标值越小，说明粗骨料抵抗受压破坏能力越强。对石子压碎指标值的规定见表 4-6。

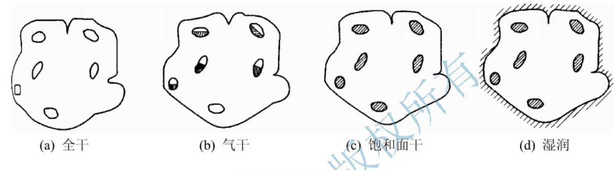
表 4-6　卵石和碎石的压碎指标

单位：%

项　　目	指　　标		
	Ⅰ类	Ⅱ类	Ⅲ类
碎石压碎指标	≤10	≤20	≤30
卵石压碎指标	≤12	≤14	≤16

8. 骨料的含水状态

骨料的含水状态可分为干燥(全干)状态、气干状态、饱和面干状态和湿润状态4种，如图4.5所示。干燥状态的骨料含水率等于或接近于零；气干状态的骨料含水率与大气湿度相平衡，但未达到饱和状态；饱和面干状态的骨料，其内部孔隙含水达到饱和，而其表面干燥；湿润状态的骨料，不仅内部孔隙含水达到饱和，而且表面还附着一部分自由水。计算普通混凝土配合比时，一般以干燥状态的骨料为基准，而一些大型水利工程，常以饱和面干状态的骨料为基准。



(a) 全干　(b) 气干　(c) 饱和面干　(d) 湿润

图4.5　骨料的含水状态

4.3　普通混凝土的基本材料选用

1. 水泥的选用

水泥是混凝土中重要的组分，配制混凝土时，应根据工程性质、部位、施工条件、环境状况等，按各品种水泥的特性合理选择水泥的品种。工程中典型通用水泥的选用原则，见表3-9。

水泥强度等级的选择应与混凝土的设计强度等级相适应。若用低强度等级的水泥配制高强度等级混凝土，不仅会使水泥用量过多(经济性不佳)，还会对混凝土产生不利影响(如带来过大的水化热和硬化收缩等)。反之，用高强度等级的水泥配制低强度等级混凝土，若只考虑强度要求，会使水泥用量偏少，影响耐久性能；若水泥用量兼顾了耐久性要求，又会导致混凝土超强而不经济。因此，根据经验一般以所选水泥强度等级标准值为混凝土强度等级标准值的1.2～2.0倍为宜，高强度等级混凝土一般要添加外加剂和外掺料，水泥强度等级反而不一定需要很高。

2. 骨料的选用

为保证混凝土的质量，一般选用符合如下要求的砂或碎(卵)石：各类有害杂质含量少(达到国标相应规定)；具有良好的颗粒形状、适宜的颗粒级配和细度(多选级配合格的中砂和连续级配石子)；表面粗糙，与水泥黏结牢固(多选碎石)；性能稳定，坚固耐久等。

3. 拌和用水的选用

混凝土用水的基本质量要求是：不影响混凝土的凝结和硬化；无损于混凝土强度发展及耐久性；不加快钢筋锈蚀；不引起预应力钢筋脆断；不污染混凝土表面。混凝土用水中的物质含量限值应符合国标相应规定。

凡能饮用的水和清洁的天然水(包括地表水和地下水)，都可用于混凝土拌制和养护。因海水含有大量无机盐及有机物，故不得用于拌制钢筋混凝土、预应力混凝土及有饰面要求的混凝土。某些工业废水经适当处理后允许用于拌制混凝土。

4.4 混凝土拌和物的和易性

拌制完成的混凝土在尚未凝结硬化之前，称为新拌混凝土或混凝土拌和物。混凝土拌和物必须具备良好的和易性，才能便于进行各项施工操作，以获得均匀而密实的混凝土，保证其硬化后的强度和耐久性。

4.4.1 和易性的概念

新拌混凝土的和易性也称工作性，是指混凝土拌和物易于施工操作(拌和、运输、浇筑、振捣等)并获得质量均匀、成型密实的混凝土性能。和易性是一项综合技术性质，它至少包括流动性、黏聚性和保水性三项独立的性能，又称为工作性。

流动性是指混凝土拌和物在自重或机械(振捣)力作用下能产生流动并均匀密实地填满模板的性能。黏聚性是指混凝土拌和物各组成材料之间有一定的黏聚力，不致在施工过程中产生离析(即由于自重或不适当的成型及振动导致混凝土各组分析出，形成不均一的拌和物)和分层现象(指严重的离析)。保水性是指混凝土拌和物具有一定的保水能力，不致在施工过程中出现严重的泌水现象(即在混凝土体积已经固定但尚未凝结之前，水分向上的运动和聚集现象)。

混凝土拌和物的流动性、黏聚性、保水性三者之间既互相关联又互相矛盾。如黏聚性好，则保水性往往也好，但流动性可能较差；当增大流动性时，黏聚性和保水性往往变差。因此，所谓拌和物的和易性良好，就是要使这三方面的性能在某种具体工作条件下得到统一，达到均为良好的状况。

4.4.2 和易性的测定方法

新拌混凝土的流动性、黏聚性和保水性有其各自独立的内涵，目前尚没有能够全面反映混凝土拌和物和易性的测定方法。通常是测定混凝土拌和物的流动性，辅以其他方法或直接观察(结合经验)评定混凝土拌和物的黏聚性和保水性，然后综合评定混凝土拌和物的和易性。按《普通混凝土拌和物性能试验方法》的规定，主要采用坍落度法和维勃稠度法。

1. 坍落度试验

将搅拌好的混凝土拌和物按一定方法装入坍落度筒内，按规定方式插捣，待装满刮平后垂直平稳地向上提起坍落度筒。量测筒高与坍落后混凝土试体最高点之间的高度差(mm)，即为该混凝土拌和物的坍落度值，如图 4.6 所示。进行坍落度试验时，应同时根据经验考察混凝土的黏聚性及保水性。

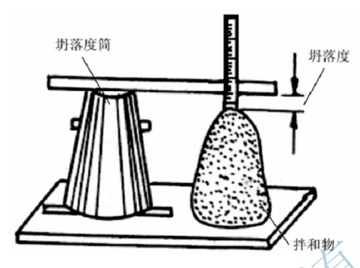


图 4.6　坍落度试验

根据坍落度的不同，可将混凝土拌和物分为：低塑性混凝土(坍落度为 10～40mm)、塑性混凝土(坍落度为 50～90mm)、流动性混凝土(坍落度为 100～150mm)、大流动性混凝土(坍落度大于 160mm)。泵送施工混凝土拌和物的坍落度一般不低于 100mm。

坍落度试验仅适用于骨料最大粒径不大于 40mm、坍落度不小于 10mm 的混凝土拌和物。实际施工时，混凝土拌和物的坍落度要根据构件截面尺寸大小、钢筋疏密、输送方式和捣实方法来确定。当构件截面尺寸较小，或钢筋较密、采用人工插捣时，坍落度选择大一些；反之，若构件截面尺寸较大，或钢筋较疏、采用机械振捣，则坍落度选择小一些。根据《混凝土结构工程施工质量验收规范(2010 版)》的规定，混凝土的浇注坍落度见表 4-7。

表 4-7　混凝土的浇筑时坍落度

项　　目	结构类型	坍落度/mm
1	基础或地面的垫层、无筋的厚大结构或配筋稀疏的结构构件	10～30
2	板、梁和大型及中型截面的柱子等	30～50
3	配筋密列的结构(薄壁、筒仓、细柱等)	50～70
4	配筋特密的结构	70～90

2. 维勃稠度试验

对于干硬性混凝土拌和物(坍落度小于 10mm)，通常采用维勃稠度法评价其和易性，振实时间愈长，流动性愈差。此方法适用于骨料最大粒径不大于 40mm，维勃稠度在 5～30s 之间的混凝土拌和物的稠度测定。



混凝土坍落度经时损失

混凝土坍落度经时损失是指新拌混凝土的坍落度随着拌和物放置时间的延长而逐渐减小。这种现象是水泥持续水化、浆体逐渐变稠凝结的结果，也是拌和物中的游离水分随着水化反应

吸附于水化产物表面或者蒸发等原因而逐渐减少造成的结果，是混凝土的正常性能，但对于泵送混凝土而言，损失过大，则混凝土入泵坍落度不能满足施工要求，易造成混凝土堵塞泵管，从而影响施工正常进行。泵送混凝土经时坍落度损失值(掺粉煤灰和木钙，经时 1h)一般可参考以下标准取值：大气温度在 10～20℃时，损失值约 5～25mm；大气温度在 20～30℃时，损失值约 25～35mm；大气温度在 30～35℃时，损失值约 35～50mm。

4.4.3 影响和易性的主要因素

1. 水泥浆的用量和水泥浆的稠度(水胶比)

混凝土拌和物的流动性主要取决于拌和物流动时内阻力的大小，而内阻力主要来源于两个方面：一是骨料间的摩擦力；二是水泥浆本身的黏稠阻力。因此，在水胶比不变的情况下，水泥浆越多，则骨料间润滑浆层越厚，拌和物的流动性越大；水胶比越大，则水泥浆越稀，水泥浆的流动阻力也越小，拌和物的流动性越大。

但水泥浆过多，不仅增加了水泥用量，还会使拌和物出现流浆现象，导致黏聚性变差，对混凝土的强度和耐久性会产生不利的影响；而水泥浆过稀，则会使拌和物黏聚性和保水性都变差，出现严重的泌水、分层或流浆现象，同时混凝土强度和耐久性也随之降低。因此，混凝土拌和物中水泥浆的用量应以满足流动性和强度的要求为宜，不宜过量；水胶比则应在满足流动性要求的前提下尽量选择较小值(这样有利于混凝土硬化后的强度和耐久性)。

根据试验结果，在使用确定骨料的前提下，如果单位体积用水量一定，单位体积水泥用量增减不超过 50～100kg，混凝土拌和物的坍落度大体可保持不变，这一规律称为固定用水量定则。这一定则为混凝土的配合比设计提供了很大的方便。

2. *砂率*

砂率指混凝土中砂的质量占砂石总质量的百分率。在混凝土拌和物中，水泥浆量固定时加大砂率，集料的总表面积及空隙率增大，使水泥浆显得比原来贫乏，从而减少了流动性；若减少砂率，使水泥浆显得富余起来，流动性会加大，但不能保证粗集料之间有足够的砂浆润滑层，也会降低拌和物的流动性，并严重影响其黏聚性和保水性。因此，采用合理的砂率(最佳砂率)，可以使拌和物获得较好的流动性以及良好的黏聚性与保水性，而且使水泥用量最省，如图 4.7 和 4.8 所示。

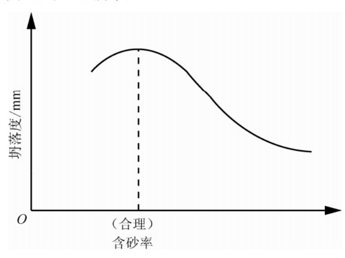


图 4.7 砂率与坍落度的关系(水与水泥用量一定)



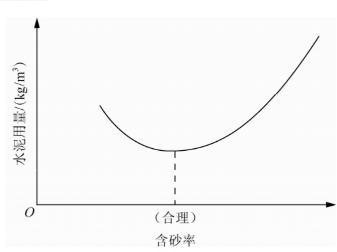


图 4.8 砂率与水泥用量的关系(达到相同的坍落度)

3. 组成材料性质的影响

水泥对和易性的影响主要表现在水泥的需水性上。需水量大的水泥品种，达到相同的坍落度需要较多的用水量。常用水泥中普通硅酸盐水泥所配制的混凝土拌和物的流动性和保水性较好。

骨料的性质对混凝土拌和物的和易性影响较大。级配良好的骨料，空隙率小，在水泥浆量相同的情况下，包裹骨料表面的水泥浆较厚，和易性好。碎石比卵石表面粗糙，相同条件下碎石所配制的混凝土拌和物流动性较卵石配制的差。细砂的比表面积大，用细砂配制的混凝土比用中、粗砂配制的混凝土拌和物流动性小。

4. 外加剂

外加剂(如减水剂、引气剂等)对拌和物的和易性有很大的影响，在拌制混凝土时，尤其是拌制泵送混凝土时，合理使用外加剂能使混凝土拌和物在不增加水泥用量的条件下获得良好的和易性，不仅流动性显著增加，而且还能有效地改善混凝土拌和物的黏聚性和保水性。

5. 时间和温度

搅拌后的混凝土拌和物随着时间的延长而逐渐变得干稠，和易性变差。其原因是：一部分水已与水泥水化，一部分水被骨料吸收，一部分水蒸发，以及混凝土凝聚结构的逐渐形成，致使混凝土拌和物的流动性变差。因此，混凝土拌和物浇注时的和易性更具实际意义，在施工中测定和易性的时间，应以搅拌完后 15min 为宜。

混凝土拌和物的和易性也受温度的影响。因为环境温度升高，水分蒸发及水化反应加快，相应使流动性降低。因此，施工中为保证一定的和易性，必须注意环境温度的变化，采取相应的措施，如夏季施工时，为了保持一定的流动性，应适当提高拌和物的用水量。

在实际施工中，可采用如下措施调整混凝土拌和物的和易性。

(1) 通过试验，采用合理砂率，并尽可能采用较低的砂率。

(2) 改善砂、石(特别是石子)的级配。

(3) 在工程条件允许的情况下，尽量采用较粗的砂、石。

(4) 当混凝土拌和物坍落度太小时，保持水胶比不变，增加适量的水泥浆；当坍落度太大时，保持砂率不变，增加适量的砂石。

(5) 有条件时应尽量掺用外加剂(如减水剂、引气剂等)。



泵送混凝土简介

泵送混凝土指可用混凝土泵通过管道输送拌和物的混凝土，其拌和物的坍落度一般不低于100mm，目前在工程中已普遍应用。泵送混凝土具有集中搅拌、远距离运输、现场泵送输送等特征和施工效率高(一般混凝土泵送量可达60m^3/h)、施工占地较小等优点。对不同泵送高度，入泵时混凝土拌和物的坍落度要求可按下表确定。

泵送高度/m	30以下	30～60	60～100	100以上
坍落度/mm	100～140	140～160	160～180	180～200

泵送混凝土原材料具有以下特点。

(1) 水泥用量较多。强度等级在C20～C60范围内水泥单位用量可达350～550kg/m^3，水胶比宜为0.4～0.6。

(2) 常添加混合材料或超细掺和料。为改善混凝土性能，节约水泥和降低造价，混凝土中常掺加粉煤灰、矿渣、沸石粉等掺和料。

(3) 砂率偏高、砂用量多。为保证混凝土的流动性、黏聚性和保水性，便于运输、泵送和浇筑，泵送混凝土的砂率要比普通流动性混凝土砂率增大6%以上，约为38%～45%。

(4) 石子最大粒径要求。粗骨料宜优先选用卵石，为满足泵送和强度要求，石子最大粒径与管道直径比一般控制在1∶2.5(卵石)、1∶3(碎石)～1∶4或1∶5。

(5) 泵送剂。减水剂、塑化剂、加气剂及增稠剂等均可用作泵送剂，可避免混凝土施工中拌和料分层离析、泌水和堵塞输送管道。

混凝土泵送结束前应正确计算尚需要的混凝土数量，及时通知搅拌站；泵送过程中被废弃的和泵送终止时多余的混凝土应妥善处理；泵送完毕后应将混凝土泵和输送管清洗干净并应防止废混凝土高速飞出伤人。泵送混凝土浇筑时应由远而近进行，在同一区域浇筑混凝土时按先竖向再水平的顺序分层连续浇筑；如不允许留施工缝时在区域之间上下层之间的混凝土浇筑间歇时间不得超过其初凝时间。在泵送时应注意以下事项：①在浇筑竖向结构混凝土时布料设备出口离模板内侧面不小于50mm，不得向模板内侧面直接冲料，更不能将料直冲钢筋骨架。②浇筑水平结构时不得在同一处连续布料，应在2～3m范围内水平布料。③分层浇筑时每层厚度宜为30～50cm，振捣时捣棒插入间距宜为40cm左右，一次振捣时间一般为15～30s，并且在20～30min后进行二次复振。④水平结构的混凝土表面应适时用木抹磨平搓毛两遍以上，最后一遍宜在混凝土收水时完成，必要时可先用铁滚筒压两遍以上，防止产生收缩。

4.5 混凝土的强度



某宾馆建筑为大厅部分22层，两翼18层，建筑面积1.8万m^2，主体结构中间大厅部分为框剪结构，两翼均为剪力墙结构，外墙板采用大模板住宅通用构件，内墙为C20钢筋混凝土。

工程竣工后，检测发现下列部位混凝土强度达不到要求。

(1) 7层有6条轴线的墙体混凝土试块28d强度为13.55MPa，至90d后取墙体混凝土芯一组，其抗压强度分别为11.03MPa、15.15MPa、14.62MPa。

(2) 10层有6条轴线墙柱上的混凝土试块28d强度为14.25MPa，至60d后取墙柱混凝土芯一组，其抗压强度分别为10.08MPa、13.66MPa、12.26MPa，除这条轴线上的混凝土强度不足外，该层其他构件也有类似问题。

思考如下几个问题。

(1) 造成该工程中混凝土强度不足的原因可能有哪些？

(2) 为了避免该工程中出现的混凝土强度不足，在施工过程中浇筑混凝土时应满足哪些要求？

(3) 在检查结构构件混凝土强度时，试件的取样与留置应符合哪些规定？

混凝土的强度包括抗压强度、抗拉强度、抗弯强度和抗剪强度等。其中抗压强度最大，抗拉强度最小，因此在结构工程中混凝土主要用于承受压力。混凝土强度与混凝土的其他性能关系密切。一般来说，混凝土的强度越高，其刚性、不透水性、耐久性也越好，故通常用混凝土强度来评定和控制混凝土的质量。

4.5.1 混凝土立方体抗压强度与强度等级

1. 混凝土立方体抗压强度

根据国家标准《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2002)规定，在混凝土浇筑前用规定方法制作标准尺寸的立方体试件，在标准条件(温度20℃±2℃、相对湿度95%以上)下，或在水中养护到28d龄期，所测得的抗压强度值即为混凝土立方体抗压强度，以f_{cu}表示，工程中即通过测定混凝土立方体抗压强度来实现对混凝土强度合格性的评定。

混凝土进行现场施工时，应按照施工规范规定原则留置试件，试件为边长150mm(也可是100mm或200mm)的立方体，留置时以组为单位留置，每组3块。工程中留置的标准养护试件用于评定混凝土强度合格性，留置的同条件养护(试件放置在工程现场条件下正常养护)试件在所需龄期进行试验测得立方体试件抗压强度值，可作为现场混凝土施工控制(如拆模、预应力筋张拉、放张等)的依据。

2. 混凝土立方体强度等级

混凝土的抗压强度与其他强度有良好的相关性，这是确定混凝土强度等级的依据。根据混凝土立方体抗压强度标准值(以$f_{cu,k}$表示)，可将混凝土划分若干不同的强度等级。混凝土强度等级采用符号C与立方体抗压强度标准值(以N/mm^2即MPa计)表示，共划分成C15、C20、C25、C30、C35、C40、C45、C50、C55、C60、C65、C70、C75、C80等强度等级。例如，C30表示混凝土立方体抗压强度标准值$f_{cu,k}$不低于30MPa。

特别提示

混凝土立方体抗压强度标准值系指按标准方法制作和养护的立方体试件，在28d龄期，用标准试验方法测得的抗压强度总体分布中的一个值，强度低于该值的百分率不超过5%(即具有强度保证率为95%的立方体抗压强度)。抗压强度标准值是用数理统计的方法计算得到的达到规定保证率的某一强度数值，并非实测立方体试件的抗压强度。

4.5.2 混凝土轴心抗压强度

确定混凝土强度等级采用立方体试件，但实际工程中钢筋混凝土构件形式极少是立方体的，大部分是棱柱体形或圆柱体形。为了使测得的混凝土强度接近于混凝土构件的实际情况，在钢筋混凝土结构计算中，计算轴心受压构件(例如柱子、桁架的腹杆等)时都采用混凝土的轴心抗压强度 f_{cp} 作为设计依据。

根据国家标准《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2002)，轴心抗压强度一般采用 150mm×150mm×300mm 的棱柱体作为标准试件。轴心抗压强度值 f_{cp} 比同截面的立方体抗压强度值 f_{cu} 小，棱柱体试件高宽比(h/a)越大，轴心抗压强度越小，但当 h/a 达到一定值后，强度不再降低。在立方体抗压强度 f_{cu} 为 10～55MPa 范围内时，轴心抗压强度 f_{cp}=(0.70～0.80)f_{cu}。

4.5.3 混凝土抗拉强度

混凝土的抗拉强度只有自身抗压强度的 1/20～1/10，且拉压比随着混凝土强度等级的提高而减小。在普通钢筋混凝土结构设计中不考虑混凝土受拉力(拉力主要由钢筋来进行承担)，但抗拉强度对混凝土的抗裂性起着重要的作用。

4.5.4 影响混凝土强度的主要因素

混凝土在凝结硬化过程中，由于水泥水化造成的化学收缩和物理收缩引起砂浆体积的变化，在粗骨料与砂浆界面存在着微裂缝。当硬化后的混凝土受力时，由于应力集中现象，这些微裂缝会逐渐扩大、延长并汇合连通起来；随后，水泥石也开始出现裂缝，最终形成贯通性裂缝，混凝土结构遭到完全破坏。所以，混凝土的强度主要取决于水泥石强度及其与骨料的黏结强度，此外，混凝土强度还受施工质量、养护条件、龄期等因素的影响。

1. 水泥强度等级与水胶比的影响

水泥强度等级和水胶比(混凝土中水的单位用量与水泥及矿物掺合料的合计单位用量的比值)是决定混凝土强度最主要的因素。在水胶比不变时，水泥强度等级越高，则硬化水泥石的强度越大，对骨料的胶结力就越强，配制成的混凝土强度也就越高。在水泥强度等级相同的条件下，混凝土的强度主要取决于水胶比。因为在拌制混凝土时，为了获得施工所要求的流动性，实际加水量一般要比水泥水化所需水量多一些，如常用的塑性混凝土，其水胶比均在 0.4～0.8 之间。当混凝土硬化后，多余的水分就残留在混凝土中或蒸发后形成气孔或通道，大大减小了混凝土抵抗荷载的有效断面，而且可能在孔隙周围引起应力集中。所以，在水泥强度等级相同的情况下，较小的水胶比，意味着水泥用量一定的前提下用水量较少，水泥石的强度就较高，与骨料黏结力也较大，混凝土强度较高。但是，如果水胶比过小，拌和物会过于干稠(即和易性不良)，在一定施工件下混凝土难以被振捣密实，可能出现较多的蜂窝、孔洞，反而会导致混凝土强度严重下降，如图 4.9 所示。

根据大量试验结果，在原材料一定的情况下，混凝土 28d 龄期抗压强度($f_{cu,o}$)与水胶比、水泥强度等因素之间存在以下线性经验公式。

$$f_{cu,o}=\alpha_a f_b(B/W-\alpha_b) \tag{4-3}$$

式中 $f_{cu,o}$——混凝土 28d 龄期的抗压强度(MPa)；

B——1m³ 混凝土中水泥用量(kg)；

W——1m³ 混凝土中水的用量(kg)；

W/B——混凝土水胶比；

f_b——胶凝材料(水泥与矿物掺合料按使用比例混合)28天胶砂强度(MPa)[试验方法应按现行国家标准《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》(GB/T 17671—1999)执行；当无实测值时，$f_b = \gamma_f \gamma_s f_{ce}$，$\gamma_f$，$\gamma_s$ 指的是粉煤灰影响系数和粒化高炉矿渣影响系数，f_{ce} 是指水泥28d胶砂抗压强度(MPa)]；

α_a, α_b——回归系数，根据工程所使用的材料，通过试验建立的水胶比与混凝土强度关系来确定；当不具备上述试验统计资料时，碎石 α_a 取0.53，α_b 取0.20；卵石 α_a 取0.49；α_b 取0.13。

以上的经验公式，一般只适用于流动性混凝土及低流动性混凝土，对于干硬性混凝土则不适用。利用混凝土强度公式，可根据所用的水泥强度和水胶比来估计所配制混凝土的强度，在混凝土配合比设计中，利用水泥强度和要求的混凝土强度等级来计算应采用的水胶比。

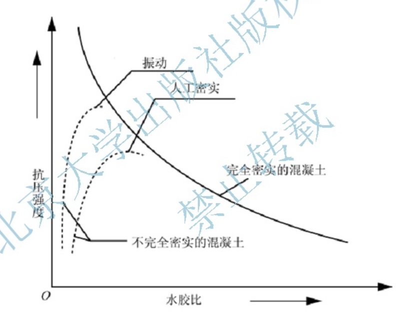


图4.9 混凝土强度与水胶比的关系

2. 骨料的影响

当骨料级配良好、砂率适当时，由于组成了坚强密实的骨架，因而有利于混凝土强度的提高。碎石表面粗糙有棱角，提高了骨料与水泥砂浆之间的机械啮合力和黏结力，所以在原材料、配合比及坍落度相同的条件下，用碎石拌制的混凝土比用卵石拌制的混凝土的强度要高。

一般骨料强度比水泥石强度高，所以不直接影响混凝土的强度。粗骨料粒形以三维长度相等或相近的球形或立方体形为好，若含有较多针状、片状颗粒，会导致混凝土强度的下降。

3. 养护温度及湿度的影响

混凝土强度是一个渐进发展的过程，温度和湿度是影响水泥水化速度和程度的重要因

素。养护温度高，水泥水化速度加快，混凝土强度的发展也快；反之，在低温下混凝土强度发展迟缓，如图4.10所示。当温度降至冰点以下时，不但水泥停止水化，混凝土强度停止发展，而且由于混凝土孔隙中的水结冰，产生体积膨胀从而使硬化中的混凝土结构遭到破坏，强度受损。同时，混凝土早期强度低，更容易冻坏，所以在冬期施工时，应特别注意采取保温措施，防止混凝土早期受冻。

水是水泥水化反应的必要条件，只有周围环境湿度适当，水泥水化反应才能不断地顺利进行，使混凝土强度得到充分发展。如果湿度不够，水泥水化不充分甚至停止水化，不仅会严重降低混凝土强度，还会促使混凝土结构疏松，形成干缩裂缝，增大渗水性，从而影响混凝土的耐久性。如图4.11所示潮湿养护对混凝土强度的影响。

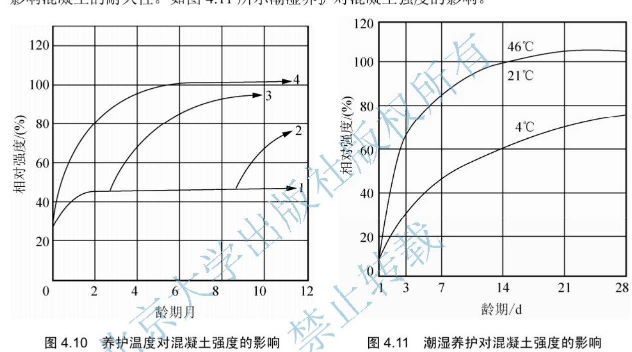


图4.10　养护温度对混凝土强度的影响

1—空气中养护；2—9个月后水中养护；
3—3个月后水中养护；4—标准湿度下养护

图4.11　潮湿养护对混凝土强度的影响

现场浇筑混凝土绝大多数采用自然养护，即在自然状态下养护混凝土。自然养护的温度随气温变化，而为保持混凝土在凝结后的潮湿状态，施工规范规定：在混凝土浇筑完毕后，应在12h内进行覆盖，以防止水分蒸发。在夏季施工的混凝土，要特别注意浇水保湿。使用硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥和矿渣水泥时，浇水保湿应不少于7d；使用火山灰水泥和粉煤灰水泥或在施工中掺用缓凝型外加剂或混凝土有抗渗要求时，保湿养护应不少于14d。

4. 龄期的影响

龄期是指混凝土在正常养护条件下所经历的时间。在正常养护的条件下，混凝土的强度将随龄期的增长而不断发展，最初7～14d内强度发展较快，以后逐渐缓慢，28d达到设计强度。28d后强度仍在发展，如果保持良好的养护条件，强度增长过程可延续数十年之久。混凝土强度与龄期的关系如图4.12所示。



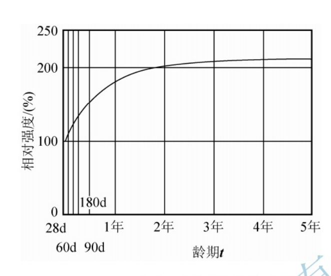


图 4.12 混凝土强度与龄期的关系

普通水泥制成的混凝土，在标准养护条件下，混凝土强度的发展大致与其龄期的常用对数成正比关系：

$$f_n/f_{28} = \lg n/\lg 28 \tag{4-4}$$

式中 f_n 和 f_{28} ——第 n 天和 28d 龄期混凝土的抗压强度(MPa)；

n ——混凝土龄期(龄期不少于 3d)。

但由于影响强度的因素比较复杂，故按此式计算的结果只能作为参考。

特 别 提 示

【引例原因分析】造成工程中混凝土强度不足的常见原因很多，主要包括以下几方面。

(1) 混凝土配合比设计不当。

(2) 混凝土原材料质量不符合要求。

(3) 混凝土搅拌过程中存在问题，如材料称量不准确、拌制时间短或拌和不均匀等。

(4) 混凝土施工中存在问题，如浇筑方法不妥、振捣不密实、养护不及时等。

(5) 预留的混凝土试件出现问题，如试模变形、出现空洞、养护不当、试件受冻等。

4.5.5 提高混凝土强度的措施

1. 采用高强度等级水泥或早强型水泥

在混凝土配合比相同的情况下，水泥的强度等级越高，混凝土的强度越高。采用早强型水泥可提高混凝土的早期强度，有利于加快施工进度。

2. 降低水胶比和单位用水量

低水胶比(较少单位用水量)的干硬性混凝土拌和物游离水分少，硬化后留下的孔隙少，混凝土密实度高，强度可显著提高。但水胶比过小，将影响拌和物的流动性，造成施工困难，一般采取同时掺加减水剂的方法，使混凝土在低水胶比下，仍具有良好的和易性。

3. 采用湿热处理养护混凝土构件

湿热处理可分为蒸汽养护及蒸压养护两类，尤以蒸汽养护常见。蒸汽养护，是将混凝

土置于60℃以上的常压饱和水蒸气中进行养护。一般混凝土经过不超过12h的蒸汽养护，其强度可达正常条件下养护28d强度的70%～80%，蒸汽养护最适于掺活性混合材料的矿渣水泥、火山灰水泥及粉煤灰水泥制备的混凝土。因为蒸汽养护可加速活性混合材料内的活性SiO_2及活性Al_2O_3与水泥水化析出的$Ca(OH)_2$反应，使混凝土不仅提高早期强度，而且后期强度也有所提高，其28d强度可提高10%～20%。而对普通硅酸盐水泥和硅酸盐水泥制备的混凝土进行过高温度或过长时间的蒸汽养护，其早期强度也能得到提高，但因在水泥颗粒表面过早形成水化产物凝胶膜层，阻碍水分继续深入水泥颗粒内部，使后期强度增长速度反而减缓。

4. 改善施工工艺

要严格按照施工规范进行操作。机械搅拌较人工拌和更能使混凝土拌和均匀，特别是在拌和低流动性混凝土拌和物时效果更加显著。采用二次投料搅拌工艺，可改善混凝土骨料与水泥砂浆之间的界面缺陷，有效提高混凝土强度。采用先进的高频振动、变频振动及多向振动设备，也可获得更好的振动密实效果。

特 别 提 示

二次投料法是先将水、水泥、砂子投入拌和机，拌和30s成为水泥砂浆，然后再投入粗集料拌和60s，这时集料与水泥已充分拌和均匀，采用这种方法，因砂浆中无粗集料，便于拌和，粗集料投入后，易被砂浆均匀包裹，有利于提高混凝土强度，并可减少粗集料对叶片和衬板的磨损。

5. 掺入混凝土外加剂、掺和料

在混凝土中合理掺用外加剂(如减水剂、早强剂等)可减少用水量，提高混凝土不同龄期强度；掺入高效减水剂的同时掺用磨细的矿物掺和料(如硅灰、优质粉煤灰、超细磨矿渣等)，可显著提高混凝土的强度，配制出强度等级为C60～C100的高强度混凝土。

知 识 链 接

【引例问题分析】

1. 为保证混凝土质量，施工中浇筑混凝土应注意以下几点。

(1) 浇筑混凝土时为避免发生离析现象，混凝土自高处倾落的自由高度不应超过2m，自由下落高度大于2m时应使用溜槽或串筒。

(2) 浇筑时应分层浇筑、振捣，在下层混凝土初凝之前，将上层混凝土浇筑并振捣完毕。

(3) 竖向结构(墙、柱等)浇筑混凝土前，底部应先填50～100mm厚与混凝土内砂浆成分相同的水泥砂浆。

(4) 在一般情况下，梁和板的混凝土应同时浇筑。

(5) 如混凝土不能连续浇筑完毕，中间间歇时间超过了混凝土的初凝时间，应留置施工缝。

2.《混凝土结构工程施工质量验收规范(2010版)》(GB 50204—2002)中明确指出：检查结构构件混凝土强度的试件，应在混凝土浇筑地点随机抽取。取样与试件留置应符合下列规定。

(1) 每拌制100盘且不超过100m^3的同配合比的混凝土，取样不得少于一次。

(2) 每工作班拌制的同一配合比的混凝土不足100盘时，取样不得少于一次。

(3) 当一次连续浇筑超过1 000m^3时，同一配合比的混凝土每200m^3取样不得少于一次。

(4) 每一层楼，同一配合比的混凝土，取样不得少于一次。

(5) 每次取样应至少留置一组标准养护试件，同条件养护试件的留置组数应根据实际需要确定。

4.6 混凝土的变形性能

水泥混凝土的变形对混凝土的结构尺寸、受力状态、应力分布、裂缝开裂等都有明显影响。混凝土的变形主要分为两大类：非荷载型变形和荷载型变形。

4.6.1 非荷载型变形

1. 化学收缩

指水泥水化物的固体体积小于水化前反应物(水和水泥)的总体积所造成的收缩。混凝土的这种体积收缩是不能恢复的，其收缩量随混凝土的龄期延长而增加，但总的收缩率一般很小。虽然化学减缩率很小，但其混凝土在收缩过程中内部会产生微细裂缝，这些微细裂缝可能会影响到混凝土的承载状态(产生应力集中)和耐久性。

2. 干湿变形

处于空气中的混凝土当水分散失时会引起体积收缩，称为干燥收缩(简称干缩)；混凝土受潮后体积又会膨胀，即为湿胀。干燥收缩又分为可逆收缩(混凝土干燥后再放入水中可恢复的部分收缩)和不可逆收缩两类。混凝土的湿胀变形量很小，一般无破坏作用。但干缩变形对混凝土危害较大，会导致混凝土表面出现拉应力而开裂，严重影响混凝土耐久性。

在混凝土结构设计中，干缩率取值一般为$(1.5\sim2.0)\times10^{-4}$mm/mm，即混凝土每1m长度收缩0.15～0.20mm。干缩主要由水泥石产生，因此，降低水泥用量、减小水胶比是减少干缩的关键。

3. 温度变形

混凝土与通常的固体材料一样呈现热胀冷缩现象，其热膨胀系数约为$(6\sim12)\times10^{-6}$/℃，即温度每升降1℃，每1m混凝土收缩0.006～0.012mm。由于混凝土的导热能力很低，水泥水化初期释放出的大量水化热会聚集在混凝土内部长期难以散失，而混凝土表面散热较快，混凝土内外温差很大(甚至高达50～70℃)，形成“内胀外缩”，混凝土表面产生很大的拉应力直至出现裂缝。因此，温度变形对大体积混凝土工程极为不利。此类工程施工时，常选用低热水泥，或采取减少水泥用量、掺加缓凝剂及人工降温等措施，以减少温度变形可能带来的质量问题。

4.6.2 荷载型变形

1. 短期荷载作用下的变形

混凝土在短期荷载作用下的变形是一种弹塑性变形，混凝土静压应力—应变曲线如

图 4.13 所示。混凝土在受荷前内部存在随机分布的不规则微细界面裂缝，当荷载不超过极限应力的 30% 时(阶段Ⅰ)，这些裂缝无明显变化，荷载(应力)与变形(应变)接近直线关系；当荷载达到极限应力的 30%～50% 时(阶段Ⅱ)，裂缝数量开始增加且缓慢伸展，应力-应变曲线随界面裂缝的演变逐渐偏离直线，产生弯曲；当荷载超过极限应力的 50% 时(阶段Ⅲ)，界面裂缝就不再稳定，而且逐渐延伸至砂浆基体中；当荷载超过极限应力的 75% 时(阶段Ⅳ)，界面裂缝与砂浆裂缝互相贯通，成为连续裂缝，混凝土变形加速增大，荷载曲线明显地弯向水平应变轴；当荷载超过极限应力时，混凝土承载能力迅速下降，连续裂缝急剧扩展而导致混凝土完全破坏。

混凝土应力-应变曲线上任一点的应力δ与其应变ε的比值，称作混凝土在该应力下的变形模量，它反映了混凝土的刚度。弹性模量 E 是计算钢筋混凝土结构的变形、裂缝的开展时必不可少的参数。一般取混凝土应力—应变曲线原点与曲线上 40%的极限应力的点之间连线的斜率(即割线模量)为该混凝土的(静)弹性模量。当混凝土强度等级为 C10～C60 时，其割线模量为(1.75～3.60)$\times 10^4$ MPa。当混凝土所含骨料较多、水胶比较小、养护较好、龄期较长时，其弹性模量较大。

2. 长期荷载作用下的变形——徐变

混凝土承受持续荷载时，随时间的延长而增加的变形，称为徐变。混凝土徐变在加荷早期增长较快，然后逐渐减缓，当混凝土卸载后，一部分变形瞬时恢复，还有一部分要过一段时间后才恢复，称徐变恢复。剩余不可恢复部分，称残余变形，如图 4.14 所示。

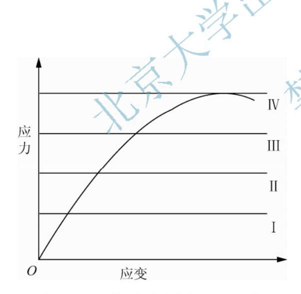


图 4.13 混凝土静压应力-应变曲线

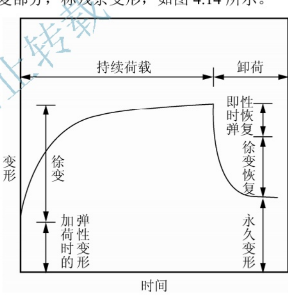


图 4.14 混凝土的徐变和恢复

混凝土的徐变对混凝土及钢筋混凝土结构物的应力和应变状态有很大影响。徐变可能超过弹性变形，甚至达到弹性变形的 2～4 倍。徐变应变一般可达(3～15)$\times 10^{-4}$mm/mm，即 0.3～1.5mm/m。在某些情况下，徐变有利于削弱由温度、干缩等引起的约束变形，从而防止裂缝的产生。但在预应力结构中，徐变将产生应力松弛，引起预应力损失，造成不利影响。因此，在混凝土结构设计时，必须充分考虑徐变的有利影响和不利影响。影响混凝土徐变的主要因素包括：环境湿度减小(导致混凝土过快失水)会使徐变增大；混凝土强度越低，水泥用量越多，徐变越大；因骨料的徐变很小，故增大骨料含量会使徐变减小。

4.7 混凝土的耐久性

混凝土除要求具备一定的强度以承受荷载外，还应具备与所处环境及使用条件相适应的耐久性能。这些性能包括抗渗性、抗冻性、抗侵蚀性、抗碳化能力、抗碱-集料反应能力等，统称为混凝土的耐久性。

4.7.1 混凝土的耐久性能

1. 混凝土的抗渗性

抗渗性是指抵抗水、油等液体在压力作用下渗透的性能。环境中各种侵蚀性介质均要通过渗透才能进入混凝土内部，因而抗渗性对混凝土的耐久性起着重要的作用。

混凝土的抗渗性以抗渗等级来表示。采用标准养护28d的标准试件，按规定的方法进行试验，以其所能承受的最大静水压(MPa)来计算其抗渗等级。有P4、P6、P8、P10、P12，共5个等级，如P6表示混凝土能抵抗0.6MPa的静水压力而不渗透。

混凝土的抗渗性主要与混凝土的密实程度及孔隙构造特征有关——混凝土密实度越小，抗渗性越差；孔隙率一定时，相互连通的孔隙越多，孔径越大，混凝土的抗渗性越差。提高混凝土抗渗性的措施有降低水胶比、掺用减水剂、引气剂、改善施工工艺、加强养护等。

2. 混凝土的抗冻性

抗冻性是指混凝土抵抗冻融循环破坏作用的能力。混凝土的冻融破坏是指混凝土毛细孔中的水结冰后体积膨胀，使混凝土产生微细裂缝，反复冻融导致裂缝扩展，混凝土由表及里剥落破坏的现象。在寒冷地区，特别是接触水又受冻的环境下的混凝土，要求具有较高的抗冻性。

混凝土的抗冻性用抗冻等级来表示。抗冻等级是以28d龄期的混凝土标准试件，在饱水后承受反复冻融循环，以抗压强度损失不超过25%且质量损失不超过5%时所能承受的最多的循环次数来表示。混凝土的抗冻等级有F10、F15、F25、F50、F100、F150、F200、F250和F300共9个等级，如F50表示混凝土能承受冻融循环的次数不少于50次。

混凝土的孔隙率、孔隙构造和孔隙的充水程度是影响抗冻性的主要因素。密实的混凝土和具有封闭孔隙的混凝土(如引气混凝土)，抗冻性较好。掺入引气剂和减水剂，可有效提高混凝土的抗冻性。

3. 混凝土的抗侵蚀性

当混凝土所处环境中含有侵蚀性介质时，混凝土便会遭受侵蚀，通常有软水侵蚀、硫酸盐侵蚀、镁盐侵蚀、碳酸盐侵蚀、一般酸侵蚀与强碱侵蚀等，其侵蚀机理与水泥腐蚀机理接近。随着混凝土在地下工程、海岸与海洋工程等恶劣环境中的大量应用，对混凝土的抗侵蚀性提出了更高的要求。混凝土的抗侵蚀性与所用水泥品种、混凝土密实度和孔隙特征等有关。密实和孔隙封闭的混凝土，环境水不易侵入，抗侵蚀性较强。

4. 混凝土的碳化

混凝土的碳化是指混凝土内水泥石中的 $Ca(OH)_2$ 与空气中的 CO_2 在湿度适宜时发生化学反应，生成 $CaCO_3$ 和 H_2O，也称中性化。混凝土的碳化是 CO_2 由表及里逐渐向混凝土内部扩散的过程。碳化对混凝土性能有正面和负面两方面的影响。

碳化首先造成混凝土碱度降低，减弱了对钢筋的保护作用。混凝土中的钢筋处在强碱性环境中(pH 值约为 12～14)而在表面生成一层钝化膜，保护钢筋不易腐蚀。但当混凝土持续碳化，穿透混凝土保护层而达到钢筋表面时，由于混凝土碱性下降，钢筋钝化膜被破坏而发生锈蚀，产生锈蚀体积膨胀，致使混凝土保护层开裂，钢筋锈蚀速度进一步加快。另外，碳化作用会增加混凝土的收缩，引起混凝土表面产生拉应力而出现微细裂缝，从而降低混凝土的抗拉、抗折强度及抗渗能力。碳化作用对混凝土也有有利的影响，碳化作用产生的碳酸钙填充了混凝土表面水泥石的孔隙，提高了混凝土表面的密实度和硬度，对提高混凝土抗压强度有利。

影响碳化速度的主要因素有环境中二氧化碳的浓度、水泥品种、水胶比、环境湿度等。当 CO_2 浓度高(如铸造车间)时，碳化速度快；当环境中的相对湿度在 50%～75%时，碳化速度最快，当相对湿度小于 25%或在水中时碳化将停止；水胶比小的混凝土较密实，CO_2 和 H_2O 不易侵入，碳化速度较慢；掺混合材料较多的水泥碱度较低，碳化速度随混合材料掺量的增多而加快。

5. 混凝土的碱—集料反应

碱-集料反应是指水泥中的碱(Na_2O、K_2O)与骨料中的活性 SiO_2 发生化学反应，在骨料表面生成复杂的碱—硅酸凝胶，凝胶吸水体积剧烈膨胀(体积可增加 3 倍以上)，从而导致混凝土产生膨胀开裂而破坏的现象。

混凝土发生碱—集料反应必须同时具备以下 3 个条件。

(1) 水泥中碱含量高。水泥中碱含量按(Na_2O+K_2O)%计算大于 0.6%。

(2) 砂、石骨料中含有活性二氧化硅成分。如蛋白石、玉髓、鳞石英等。

(3) 有水存在。在无水情况下，混凝土不可能发生碱—集料反应。

碱—集料反应缓慢，其破坏后果往往要经过几年甚至十几年后才会明显暴露出来，且一旦发现，难以有效抑制其持续发展，故素有混凝土的“癌症”之称，应以预防为主。

预防碱—集料反应的措施有：控制水泥总含碱量不超过 0.6%；选用非活性骨料；降低混凝土单位水泥用量以降低单位混凝土的含碱量；在混凝土中掺入火山灰质混合材料以减少膨胀值；防止水分侵入，设法使硬化后混凝土处于干燥状态。

4.7.2 提高混凝土耐久性的措施

当混凝土的环境条件变化时，对其所要求的耐久性具体内容也各有侧重，但混凝土的密实程度是始终影响其耐久性的主要因素。

综合来看，影响混凝土耐久性的主要因素大致有以下几点。

首先，在混凝土工程中为了满足混凝土施工工作性要求，即用水量大、水胶比高，因而导致混凝土的孔隙率很高，约占水泥石总体积的 25%～40%，特别是其中毛细孔占相当大部分，毛细孔是水分、各种侵蚀介质、氧气、二氧化碳及其他有害物质进入混凝土内部的通道，引起混凝土耐久性的不足。

其次，水泥石中的水化物稳定性不足也会对耐久性产生影响。例如，通用硅酸盐水泥水化后的主要化合物是碱度较高的高碱性水化硅酸钙、水化铝酸钙、水化硫铝酸钙等。此外，在水化物中还有数量很大的游离 $Ca(OH)_2$，它的强度很低、稳定性极差，在侵蚀条件下，是首先遭到侵蚀的部分。因此必须减少这些稳定性低的组分，尤其是游离 $Ca(OH)_2$ 的含量。

提高混凝土耐久性的主要措施有以下几种。

(1) 合理选用原材料。具体包括：选择适宜的水泥品种，可根据混凝土工程的特点和所处的环境条件，合理选用水泥(如低碱水泥)；选用质量良好、技术条件合格的砂石骨料；根据工程特点及环境特点合理掺用外加剂(如减水剂、引气剂)，改善混凝土的孔隙结构，提高混凝土的抗渗性和抗冻性。

(2) 保证合理的混凝土配合比。控制水胶比及保证足够的胶凝材料用量是保证混凝土密实度并提高混凝土耐久性的关键。根据不同的环境类别和混凝土等级《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ 55—2011)和《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)规定了工业与民用建筑所用混凝土的最大水胶比和最小胶凝材料用量的限值，见表 4-8 和 4-9。

(3) 改进施工操作程序及工艺，保证混凝土施工质量。

表 4-8　混凝土结构的环境类别

环境类别	条　　件
一	室内干燥环境； 无侵蚀性静水浸没环境
二(a)	室内潮湿环境； 非严寒和非寒冷地区的露天环境； 非严寒和非寒冷地区与无侵蚀性的水或土壤直接接触的环境； 严寒和寒冷地区的冰冻线以下与无侵蚀性的水或土壤直接接触的环境
二(b)	干湿交替环境； 水位频繁变动环境； 严寒和寒冷地区的露天环境； 严寒和寒冷地区的冰冻线以上与无侵蚀性的水或土壤直接接触的环境
三(a)	严寒和寒冷地区冬季水位变动区环境； 受除冰盐影响环境； 海风环境
三(b)	盐渍土环境； 受除冰盐作用环境； 海岸环境
四	海水环境
五	受人为或自然的侵蚀性物质影响的环境

注：(1)室内潮湿环境是指结构表面经常处于结露或潮湿状态的环境。

(2)严寒和寒冷地区的划分应符合国家现行标准《民用建筑热工设计规范》(GB 50176—1993)的有关规定。

(3)海岸环境和海风环境宜根据当地情况，考虑主导风向及结构所处迎风，背风部位等因素的影响由调查研究和工程经验确定。

(4)受除冰盐影响环境为受到除冰盐盐雾影响的环境；受除冰盐作用环境指被除冰盐溶液溅射的环境以及使用除冰盐地区的洗车房、停车楼等建筑。

表 4-9　混凝土的最大水胶比和最小胶凝材料用量

环境等级	最大水胶比	最低强度等级	最小胶凝材料用量/(kg/m^3)		
			素混凝土	钢筋混凝土	预应力混凝土
一	0.60	C20	250	280	300
二(a)	0.55	C25	280	300	300
二(b)	0.50(0.55)	C30(C25)	320		
三(a)	0.45(0.50)	C35(C30)	330		
三(b)	0.40	C40			

注：(1)素混凝土构件的水胶比及最低强度等级的要求可适当放松。

(2)有可靠工程经验时，二类事到环境中的最低混凝土强度等级可降低一个等级。

(3)处于严寒和寒冷地区二(b)，三(a)类环境中的混凝土应使用引气剂，并可采用括号中的有关参数。



混凝土结构工程的耐久性现状

混凝土结构的耐久性是当前困扰土建基础设施工程的世界性问题，并非我国所特有，但是至今尚未引起我国有关政府主管部门和广大设计与施工部门的足够重视。长期以来，人们曾一直以为混凝土是非常耐久的材料。直到 19 世纪 70 年代末期，发达国家才逐渐发现原先建成的基础设施工程在一些环境下出现过早损坏。美国许多城市的混凝土基础设施工程和港口工程建成后不到二三十年，甚至在更短的时期内就出现劣化。据 1998 年美国土木工程学会的一份材料估计，他们需要有 1 300 亿美元来处理美国国内基础设施工程存在的问题，仅修理与更换公路桥梁的混凝土桥面板一项就需 80 亿美元。另有资料指出，美国因除冰盐引起钢筋锈蚀需限载通行的公路桥梁已占这一环境下桥梁的 1/4。发达国家为混凝土结构耐久性投入了大量科研经费并积极采取应对措施。如加拿大安大略省的公路桥梁为对付除冰盐侵蚀及冻融损害，钢筋的混凝土保护层最小厚度从 20 世纪 50 年代的 2.5cm 逐渐增加到 4cm、6cm，直到 80 年代后的 7cm，而混凝土强度的最低等级也从 50 年代的 C25 增到后来的 C40。而我国遭受盐冻侵蚀地区的公路桥梁在耐久性设计方面至今仍无明确要求，对混凝土保护层和强度的要求仅为 2.5cm 与 C25，与上面提到的加拿大 50 年代水准一致。

我国建设部于 20 世纪 80 年代的一项调查表明，国内大多数工业建筑物在使用 25～30 年后即需大修，处于严酷环境下的建筑物使用寿命仅 15～20 年。民用建筑和公共建筑的使用环境相对较好，一般可维持 50 年以上。但室外的阳台、雨罩等露天构件的使用寿命通常仅有 30～40 年。桥梁、港工等基础设施工程的耐久性问题更为严重。由于钢筋的混凝土保护层过薄且密实性差，许多工程建成后几年就出现钢筋锈蚀、混凝土开裂的现象。海港码头一般使用 10 年左右就因混凝土顺筋开裂和剥落而需要大修。京津地区的城市立交桥由于冬天洒除冰盐及冰冻作用，使用 10 多年后就出现问题，有的不得不限载、大修或拆除。盐冻也对混凝土路面造成伤害，东北地区一条高等级公路只经过一个冬天就大面积剥蚀。

耐久性问题的严重性和迫切性在于许多正在建设的工程仍未吸取国际和国内的大量惨痛教训，还沿着老路重蹈覆辙。一些北方城市新建成的立交桥和高速公路桥，仍没有在材料性能和

结构构造等方面采取必要的防治冻融和盐害的综合措施，甚至大型工程如2000年投入运行的珠海澳门莲花跨海大桥，其主体结构在浪溅区仍采用不耐海水干湿交替侵蚀的C30混凝土与3～4cm厚的保护层厚度。

有专家估计，我国“大建”基础设施工程建设的高潮还可延续20年，由于忽视耐久性，迎接人们的可能还会有“大修”20年的高潮，而且这个高潮不用很久就将到来，其耗费将倍增于这些工程的建设投资。

使混凝土结构的耐久性问题进一步加剧的原因还有以下几方面。

(1) 由于混凝土的质量检验习惯上以单一的强度指标作为衡量标准，导致水泥工业对水泥强度的不适当追求使水泥细度增加，早强的矿物成分比例提高，这些都不利于混凝土的耐久性。我国对水泥质量的检验在强度上只要求不低于规定的最低许可值，而国外则同时还要求不高于规定的最高值，如果强度超过了也被认为不合格，这种要求还有利于水泥产品质量的均匀性。

(2) 工程施工单位不适当地加快施工进度，尤其是政府行政领导对工程进度的不适当干预。混凝土的耐久性质量尤其需要有足够的施工养护期加以保证，早产有损生命健康的概念同样适用于混凝土。国内媒体上大力宣传的所谓几个月就修成一条大路、建成一座大桥或盖成一幢高楼的工程以及抢工献礼工程，很可能就是今后注定要花掉更多资金进行大修的短命工程。提前完成合同规定施工期的在国外要被罚款，因为意味着工程质量有遭到损害的可能。

(3) 工程使用环境的不断恶化，如废气、酸雨等日益严重的大气污染，也对工程混凝土造成了严重的侵蚀和危害。我国的酸雨面积已超过国土面积的30%。

4.8 混凝土外加剂及外掺料

4.8.1 外加剂的概念及分类

混凝土搅拌过程中掺入的，用以改善混凝土性能的物质称为混凝土外加剂，其掺量一般不超过水泥质量的5%。外加剂在混凝土工程中的应用非常广泛，已逐渐成为混凝土的第五种组分。外加剂种类较多，一般按其主要功能分为以下四类。

(1) 改善新拌混凝土流变性能的外加剂，包括减水剂、引气剂、泵送剂等。

(2) 调节混凝土凝结硬化性能的外加剂，包括缓凝剂、早强剂、速凝剂等。

(3) 改善混凝土耐久性的外加剂，包括引气剂、防水剂、阻锈剂等。

(4) 改善混凝土其他性能的外加剂，包括加气剂、膨胀剂、防冻剂、防水剂、泵送剂等。

工程中常用的外加剂包括减水剂、引气剂、早强剂、缓凝剂、防冻剂、膨胀剂等。

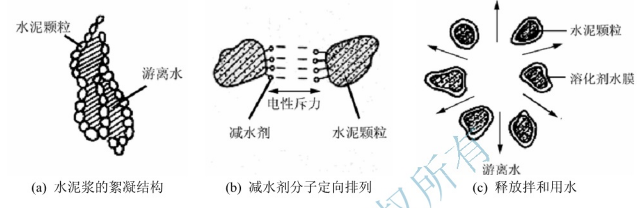
4.8.2 外加剂的介绍

1. 减水剂

1) 减水剂的作用机理

减水剂属于表面活性剂，其分子由亲水基团和憎水基团两部分组成。在水溶液中加入表面活性剂(如减水剂)后，亲水基团指向溶液，而憎水基团指向空气、非极性液体或固体，作定向排列，组成吸附膜，因此降低了水的表面张力。当水泥加水拌和后，由于水泥颗粒间分子凝聚力的作用，使水泥浆形成絮凝结构，如图4.15(a)所示，这种絮凝结构将一部分

拌和水(游离水)包裹在水泥颗粒之间，降低了混凝土拌和物的流动性。如在水泥浆中加入减水剂，减水剂的憎水基团定向吸附于水泥颗粒表面，使水泥颗粒表面带有相同的电荷。在电性斥力作用下水泥颗粒分开，从而将絮凝结构内的游离水释放出来，如图 4.15(b)、(c)所示。减水剂的这种分散作用使混凝土拌和物在不增加用水量的情况下，增加了流动性。



(a) 水泥浆的絮凝结构　　(b) 减水剂分子定向排列　　(c) 释放拌和用水

图 4.15　减水剂作用机理

2) 减水剂的技术经济效果

混凝土中加入减水剂后，可获得如下几种不同的使用效果。

(1) 增加流动性。在用水量及水胶比不变时，混凝土坍落度可增大 80～200mm，且不影响混凝土强度。

(2) 减水增强。在保持流动性及水泥用量不变的条件下，可减少拌和水量 8%～45%，从而降低了水胶比，使混凝土 28d 强度提高 10%～35%，早期强度提高则更为显著。

(3) 节约水泥。在保持流动性及水胶比不变的条件下，可以在减少拌和水量的同时，相应减少水泥用量，即在保持混凝土强度不变时，可节约水泥用量 10%～25%。

(4) 改善混凝土的耐久性。由于减水剂的掺入，显著地改善了混凝土的孔隙结构，使混凝土的密实度提高，透水性降低，从而可提高抗渗、抗冻、抗化学腐蚀等能力。

3) 减水剂的主要品种

(1) 普通减水剂。普通减水剂主要品种有木质素磺酸钙(即木钙)、木质素磺酸钠等。普通减水剂属于缓凝型减水剂，可以改善混凝土拌和物的泌水、离析现象，延缓混凝土拌和物的凝结时间，减慢水泥水化放热速度。但掺量过多，除造成缓凝外，还可能导致强度下降，因而不利于冬季施工。木钙是此类减水剂的代表性品种，一般为棕黄色粉末，掺量为水泥质量的 0.2%～0.3%，该减水剂价格较便宜，应用广泛。

(2) 高效减水剂。高效减水剂主要品种有多环芳香族磺酸盐类减水剂、水溶性树脂磺酸盐类减水剂、脂肪族类减水剂等。

萘系高效减水剂是多环芳香族磺酸盐类减水剂的代表性品种，一般为棕色粉末或黏稠液体，掺量为水泥质量的 0.75%～1.5%(粉剂)或 1.5%～2.5%(液体)。萘系减水剂是我国目前生产量最大、应用最广泛的高效减水剂(占高效减水剂总产量 80%以上)，其特点是减水率较高(15%～25%)、不引气、对凝结时间影响小、与水泥适应性相对较好，能与其他各种外加剂复合使用，价格也相对便宜。萘系减水剂常被用于配制大流动性、高强、高性能混凝土，但单纯掺加萘系减水剂的混凝土坍落度损失较快。



(3) 高性能减水剂。聚羧酸系高性能减水剂是高性能减水剂的代表性品种，是使混凝土在减水、保坍、增强、收缩及环保等方面具有优良性能的外加剂，掺量为水泥质量的0.8%～1.5%，其主要特点有：减水率高(可高达45%)、坍落度轻时损失小(预拌混凝土2h坍落度损失小于15%，对于商品混凝土的长距离运输及泵送施工极为有利)、混凝土工作性好(即使在高坍落度情况下也不会有明显的离析、泌水现象)、与不同品种水泥和掺和料相容性好、混凝土收缩小、产品无毒无害(绿色环保产品)、经济效益好(虽单价较高，但工程长期综合的成本低于其他类型产品)等，常用于配制高流动性混凝土、自流平混凝土、自密实混凝土、清水饰面混凝土，尤其适用于配制高强及高性能混凝土。



知识链接

我国减水剂应用现状

2009年，我国混凝土外加剂总产量达722.5万吨，其中各种合成减水剂产量约484.7万吨。各种高效减水剂占全部合成减水剂总量的67%，聚羧酸系高性能减水剂占26%，普通减水剂(木质素磺酸盐减水剂)占7%。在高效减水剂中，萘系占总产量的82.53%、脂肪族占12.85%、氨基磺酸盐占2.85%、蒽系占1.32%、三聚氰胺系占0.45%。

20世纪90年代国外开始使用聚羧酸系高性能减水剂，日本现在的使用率占高效减水剂的60%～70%，欧美约占20%。2000年前后，我国混凝土工程界逐渐认识和应用聚羧酸系高性能减水剂。近几年来，在高速铁路建设的带动下，高性能减水剂发展迅猛，得以大量推广应用。国内2007—2009年建设的26条高速铁路项目中，截止到2009年底未完成施工的线路有22条，据测算，这些线路在2010—2014年还将至少招标聚羧酸系高性能减水剂48.2万吨。而随着我国新一轮大规模基本建设的展开，聚羧酸系高性能减水剂必将在铁路、公路、土木工程等领域得到更大规模的应用。

应用案例

宜万铁路宜昌长江大桥于2003年11月26日开工，2007年2月9日主体工程建成，由中铁大桥局集团一公司施工。大桥主跨结构采用纵横竖三向预应力混凝土连续刚构柔性拱结构，主跨总长度 810(130+2×275+130)m，其跨度之大在当时同类桥梁中居亚洲第一、世界第二。3个主墩的$0^{\#}$块体，混凝土用量近3 000m^3，材料总共近万吨，故称为“万吨$0^{\#}$块”。宜万铁路宜昌长江大桥结构新颖。质量要求高、施工难度大，大桥主梁采用了添加聚羧酸系高效减水剂的C60高性能混凝土。

工程对混凝土性能的要求是：①4d强度达到设计强度的90%以上，以便实施预应力张拉；②要求降低混凝土黏度，减小坍落度损失，以保证混凝土的正常浇筑施工；③降低水化热，延迟水化热峰值出现，以避免温升开裂；④要求混凝土流动性好，能充分满足施工浇筑要求；⑤减少混凝土表面气泡，做到内实外光、棱角分明；⑥要求混凝土低碱、无氯，低收缩、高抗渗，以满足耐久性要求。

经多次试验，最终选定原材料和混凝土配合比如下：①水泥：葛洲坝水泥厂生产的PO42.5水泥；②细骨料：洞庭湖中砂；③粗骨料：宜昌碎石，粒径5～20mm；④减水剂：山东某公司

生产的 NOF2AS 型聚羧酸系高效减水剂；⑤矿物外掺料：葛洲坝水泥厂生产的粉煤灰矿渣超细粉，其比例为矿渣：粉煤灰=1：3。

如表 4-10 所示为混凝土选定配合比和实验实训性能。

表 4-10　混凝土选定配合比和实验室实测性能

水泥/kg	掺和料/kg	砂/kg	碎石/kg	水/kg	减水剂/kg	初坍落度/cm	1h 坍落度/cm	强度/MPa		
								4d	7d	28d
378	162	682	1067	151	7.02	22.5	22.0	55.4	64.3	77.9

工程实践表明：掺聚羧酸系减水剂混凝土工作性好、坍落度损失小、流动性好、可泵性好、不易堵管、含气量易于控制、水化放热平稳，拌和物本身有一定的自密实性，浇筑后混凝土外观光亮、气泡较少且表面密实、棱角分明。混凝土各项性能完全达到设计要求。

2. 引气剂

引气剂在混凝土搅拌过程中掺入，能引入大量分布均匀的微小气泡，可改善混凝土拌和物的和易性，减少泌水、离析现象，并能显著提高混凝土耐久性。

引气剂属憎水性表面活性剂，由于能显著降低水的表面张力和界面性能，使水溶液在搅拌过程中极易产生大量微小(直径多在 200μm 以下)的封闭气泡，使混凝土含气量增大到 3%～5%(不加引气剂的混凝土含气量取 1%)，且气泡稳定不易破裂。这些气泡如同滚珠一样，减少了混凝土各组分颗粒间的摩擦阻力，同时减少了自由移动的水量，改善了混凝土拌和物的和易性；大量均匀分布的封闭气泡切断了混凝土中的毛细管渗水通道，改变了混凝土的孔隙结构，使混凝土抗渗性显著提高；同时，封闭气泡有较大的弹性变形能力，对由水结冰所产生的膨胀应力有一定的缓冲作用，因而混凝土的抗冻性得到提高。但混凝土含气量的增大会导致强度的下降，因此，为保持混凝土的力学性能，引入的气泡应适量。

目前应用较多的引气剂有松香热聚物、松香皂、烷基苯磺酸盐等。其适宜掺量为水泥质量的 0.005%～0.02%。

3. 早强剂

早强剂可加速混凝土硬化过程，明显提高混凝土的早期强度(3d 强度可提高 40%～100%)，并对混凝土最终强度无显著影响，多用于冬季施工混凝土和抢修工程，或用于加快模板的周转率。常用早强剂有无机盐(如氯化钙、氯化钠、硫酸钠、硫代硫酸钠)和有机物(如三乙醇胺)两大类。

各类早强剂的掺量均应严格控制。如使用含氯盐早强剂会加速混凝土中钢筋的锈蚀，为防止氯盐对钢筋的锈蚀，一般可采取将氯盐与阻锈剂(如亚硝酸钠)复合使用；硫酸盐对钢筋无锈蚀作用，并能提高混凝土的抗硫酸盐侵蚀性，但若掺入量过多时，会导致混凝土后期性能变差，且混凝土表面易析出“白霜”，影响外观与表面装饰；三乙醇胺对混凝土稍有缓凝作用，掺入量过多时，会造成混凝土严重缓凝和混凝土强度下降。

在实际应用中，早强剂单掺效果不如复合掺加。因此，较多使用由多种组分配成的复合早强剂(如硫酸钠加三乙醇胺、三乙醇胺加亚硝酸钠加二水石膏)，使用效果更好。

4. 缓凝剂

缓凝剂的主要作用是延缓混凝土凝结时间和水泥水化热释放速度，且对混凝土后期强度发展无不利影响。多用于大体积混凝土、泵送和滑模混凝土施工以及高温炎热气候下远距离运输的商品混凝土。在分层浇灌混凝土时，为防止出现冷缝，也常掺加缓凝剂。

缓凝剂主要有四类：糖类，如糖蜜；木质素磺酸盐类，如木钙、木钠；羟基梭酸及其盐类，如柠檬酸、酒石酸；无机盐类，如锌盐、硼酸盐等。常用的缓凝剂是木钙和糖蜜，其中糖蜜的缓凝效果最好，其适宜掺量为0.1%～0.3%，混凝土凝结时间可延长2～4h。

缓凝剂对水泥品种适应性十分明显，用于不同品种水泥缓凝效果不相同，甚至会出现相反效果，因而，缓凝剂使用前必须进行试拌，检测其效果。

5. 防冻剂

防冻剂是能使混凝土在负温下硬化，并在规定养护条件下达到预期性能的外加剂。常用的防冻剂有氯盐类(如氯化钙、氯化钠)；氯盐阻锈类(以氯盐与亚硝酸钠阻锈剂复合而成)；无氯盐类(以硝酸盐、亚硝酸盐、碳酸盐、乙酸钠或尿素复合而成)。

氯盐类防冻剂适用于无筋混凝土；氯盐阻锈类防冻剂可用于钢筋混凝土；无氯盐类防冻剂可用于钢筋混凝土和预应力钢筋混凝土。硝酸盐、亚硝酸盐、碳酸盐易引起钢筋的应力腐蚀，故此类防冻剂不适用于预应力混凝土以及与镀锌钢材相接触部位的混凝土结构。

防冻剂一般适用于-15～0℃的气温条件下施工的混凝土，当在更低气温下施工时，应增加其他混凝土冬季施工措施，如暖棚法、原料(砂、石、水)预热法等。

6. 膨胀剂

膨胀剂是能使混凝土产生一定体积膨胀的外加剂。使用膨胀剂可在混凝土内产生约0.2～0.7MPa的膨胀应力，抵消由于干缩而产生的拉应力，增大混凝土密实度，提高混凝土抗裂性和抗渗性，多用于补偿收缩工程(如防水抗渗混凝土)、灌注及接头填缝、自应力混凝土压力管等。

膨胀剂主要有硫铝酸钙类膨胀剂(如明矾石、CSA微膨胀剂)、氧化钙等。

4.8.3 外加剂应用

1. 外加剂品种的选择

选择外加剂时，应根据工程特点、材料种类和施工条件，参考外加剂产品说明书选择，如有条件应进行实验验证。混凝土选用外加剂的参考资料，见表4-11。

表4-11 混凝土外加剂选用参考资料

混凝土类型	应用外加剂目的	适宜的外加剂
高强混凝土	1. 减少混凝土的用水量，提高混凝土的强度 2. 提高施工性能，以便用普通的成型工艺施工 3. 减少混凝土水泥用量，减少混凝土的徐变和收缩	高效减水剂
泵送混凝土	1. 提高可泵送性，控制坍落度8～16cm，混凝土有良好的黏聚性，离析、泌水现象少 2. 确保硬化混凝土质量	泵送剂 1. 减水剂(低坍落度损失) 2. 膨胀剂

续表

混凝土类型	应用外加剂目的	适宜的外加剂
大体积混凝土	1. 降低水泥初期水化热 2. 延缓混凝土凝结时间 3. 减少水泥用量 4. 避免干缩裂缝	1. 缓凝型减水剂 2. 缓凝剂 3. 引气剂 4. 膨胀剂(如大型设备基础)
防水混凝土	1. 减少混凝土内部孔隙 2. 改变孔隙的形状和大小 3. 堵塞漏水通路，提高抗渗性	1. 减水剂与引气型气减水剂 2. 膨胀剂 3. 防水剂
自然养护预制混凝土	1. 缩短生产周期，提高产量 2. 节省水泥 5%～15% 3. 改善工作性能，提高构件质量	1. 普通减水剂 2. 早强型减水剂 3. 高效减水剂 4. 引气减水剂
大模板施工混凝土	1. 提高和易性，确保混凝土具有良好流动性、保水性和黏聚性 2. 提高混凝土早期强度，以满足快速拆模和一定的扣板强度	1. 夏季：普通减水剂，低掺量的高效减水剂 2. 冬季：早强减水剂或减水剂与早强剂复合使用
滑动模板施工混凝土	1. 夏季延长混凝土的凝结时间，便于滑升和抹光； 2. 冬季早强，保证滑升速度	1.夏季宜用木钙等缓凝型减水剂 2.冬季宜用高效减水剂或减水剂与早强剂复合使用
商品(预拌)混凝土	1. 节约水泥，获得经济效益 2. 保证混凝土运输后的和易性，以满足施工要求确保混凝土的质量 3. 满足对混凝土的某些特殊要求	1. 夏季及运输距离长时，宜用木质磺酸盐、糖蜜等缓凝减水剂 2. 为满足各种特殊要求，选用不同性质的外加剂
耐冻融混凝土	1. 引入适量的微气泡，缓冲冰胀应力 2. 减小混凝土水胶比，提高混凝土抗冻融能力	1. 引气减水剂 2. 引气剂 3. 减水剂
夏季施工混凝土	缓凝	1. 缓凝型减水剂 2. 缓凝剂
冬季施工混凝土	1. 加快施工进度，提高构件质量 2. 防止冻害	1. 不受冻地区，用早强减水剂或单掺早强剂 2. 要求防冻地区，应选用防冻剂 3.引气减水剂加早强剂加防冻剂

2. 外加剂掺量的确定及掺入方法

一般情况下，外加剂产品说明书都列出推荐的掺量范围，可参照选用。若没有可靠的资料为参考依据时，应尽可能通过试验来确定外加剂掺量。

外加剂的掺量很少，必须保证其均匀分散，一般不能直接加入混凝土搅拌机内。对于可溶于水的外加剂，应先配成一定浓度的溶液，随水加入搅拌机；对于不溶于水的外加剂，应与适量水泥或砂混合均匀后，再加入搅拌机内。另外，外加剂的掺入时间，对其效果的

发挥也有很大影响，如减水剂有同掺法、后掺法、分掺法等方法。同掺法指减水剂在混凝土搅拌时一起掺入；后掺法指搅拌好混凝土后间隔一定时间，然后再掺入；分掺法指一部分减水剂在混凝土搅拌时掺入，另一部分在间隔一段时间后再掺入。

4.8.4 混凝土掺和料简介

在混凝土拌和物制备时，为了节约水泥、改善混凝土性能、调节混凝土强度等级而加入的天然或人造矿物材料，统称为混凝土掺和料。混凝土掺和料多为活性矿物掺和料，其本身不硬化或硬化速度很慢，但能与水泥水化生成的$Ca(OH)_2$发生化学反应，生成具有水硬性的胶凝材料，如粉煤灰(一般是煤在电厂焚烧后的产物)、硅灰、粒化高炉矿渣粉、沸石粉等。

1. 粉煤灰

低钙粉煤灰(一般 CaO 百分含量＜10%)不同于水泥中作为混合材料的高钙粉煤灰，它来源比较广泛，是当前用量最大、使用范围最广的混凝土掺和料。其技术经济效果包括以下几方面。

(1) 节约水泥：一般可节约水泥 10%～15%，有显著的经济效益。

(2) 改善混凝土拌和物的和易性和可泵性。

(3) 降低混凝土水化热，是大体积混凝土的主要掺和料。

(4) 提高混凝土抗硫酸盐性能。

(5) 提高混凝土抗渗性。

(6) 抑制碱-骨料反应。

粉煤灰按细度、烧失量等指标分为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ这 3 个等级(Ⅰ级质量最佳)，按《粉煤灰混凝土应用技术规范》要求，配制泵送混凝土、大体积混凝土、抗渗结构混凝土、抗硫酸盐和抗软水侵蚀混凝土、蒸养混凝土、轻骨料混凝土、地下工程和水下工程混凝土、压浆和碾压混凝土等，均可掺用粉煤灰。

2. 硅灰

硅灰又称硅粉或硅烟灰，是从生产硅铁合金或硅钢时所排放的烟气中收集到的颗粒极细的烟尘。硅灰颗粒是微细的玻璃球体，呈浅灰到深灰，其粒径为 0.1～1.0μm，是水泥颗粒粒径的 1/50～1/100。其技术经济效果包括以下几方面。

(1) 由于硅灰具有极高的比表面积，施工中多配以减水剂或高效减水剂，可获得拌和物黏聚性和保水性俱佳的高流态混凝土和泵送混凝土。

(2) 适合配制高强、超高强混凝土。混凝土掺入占水泥质量 5%～10%的硅灰，同时掺用高效减水剂，可配制出抗压强度高达 100MPa 的超高强混凝土。

(3) 硅灰掺入混凝土后，混凝土总孔隙率虽变化不大，但其毛细孔会相应变小，因而抗渗性明显提高，抗冻性及抗腐蚀性也得以改善。



预拌混凝土

预拌混凝土是指由水泥、集料、水以及根据需要掺入的外加剂、矿物掺合料等组分按一定比例，在搅拌站经计量、拌制后出售的并采用运输车，在规定时间内运至使用地点的混凝土拌合物。因其多作为商品出售，故也称商品混凝土。

混凝土集中搅拌有利于采用先进的工艺技术，实行专业化生产管理。设备利用率高，计量准确，将配合好的干料投入混凝土搅拌机充分拌和后，装入混凝土搅拌输送车，因而产品质量好、材料消耗少、工效高、成本较低，又能改善劳动条件，减少环境污染。2012 年我国共生产预拌混凝土 16.45 亿 m^3。

4.9 混凝土质量控制与评定

混凝土质量控制包括以下 3 个过程。

(1) 混凝土生产前的初步控制，主要包括人员配备、设备调试、组成材料的检验及配合比的确定与调整等内容。

(2) 混凝土生产过程的控制，包括控制称量、搅拌、运输、浇筑、振捣及养护等内容。

(3) 混凝土生产后的合格性控制，包括批量划分、确定每批取样数量、确定检测方法和验收界限等内容。

在混凝土生产管理中，由于其抗压强度与其他性能有较好的相关性，能较好地反映混凝土整体的质量情况，因此工程中通常以混凝土抗压强度作为评定和控制其质量的主要指标。

4.9.1 混凝土的质量波动与统计

1. 混凝土质量波动

在混凝土正常的施工条件下，按同一配合比生产的混凝土质量也会产生波动。造成强度波动的原因有原材料质量的波动和运输、浇筑、振捣、养护条件的变化等。另外，由于试验机的误差及试验人员操作的差异，也会造成混凝土强度测试值的波动。在正常条件下，上述因素都是随机变化的，混凝土强度受这些随机变量的影响，因此可以用数理统计的方法来对其进行评定。

对在一定条件下生产的混凝土进行随机取样测定其强度，当取样次数足够多时，数据整理后绘成强度概率分布曲线，一般接近正态分布，如图 4.16 所示。曲线的最高点为混凝土的平均强度 $\overline{f}_{cu}$ 的概率。以平均强度为轴，左右两边曲线是对称的。距对称轴越远的强度，出现的概率越小，并以横轴为渐近线逐渐趋近于零。曲线与横轴之间的面积为概率总和，等于 100%。

当混凝土平均强度相同时，概率曲线窄且高，说明强度测定值比较集中、波动小、混凝土的均匀性好、施工水平高；曲线宽而矮，说明强度值离散程度大、混凝土的均匀性差、施工水平较低。

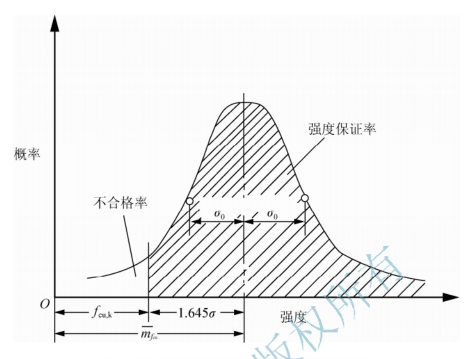


图 4.16　混凝土强度正态分布与强度保证率

2. 混凝土质量的统计评定

混凝土的质量可以用数理统计方法中样本的算术平均值$m_{f_{cu}}$，标准差σ_0、变异系数(离差系数)C_v、强度保证率P等参数评定。

强度平均值：

$$m_{f_{cu}} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} f_{cu,i} \tag{4-5}$$

标准差：

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} f_{cu,i}^2 - n m_{f_{cu}}^2}{n-1}} \tag{4-6}$$

变异系数：

$$C_v = \frac{\sigma_0}{m_{f_{cu}}} \tag{4-7}$$

式中　$m_{f_{cu}}$——n组混凝土试件强度的算术平均值(MPa)；

$f_{cu,i}$——第i组混凝土立方体抗压强度的试验值(MPa)；

n——试验组数。

强度的算术平均值表示混凝土强度的总体平均水平，但不能反映混凝土强度的波动情况。标准差(均方差)是评定混凝土质量均匀性的指标，表示一批混凝土强度整体上与其算术平均值的距离，在数值上等于正态分布曲线的拐点与强度平均值的距离。标准差愈大，说明强度的离散程度愈大，混凝土的质量愈不稳定。变异系数又称离差系数，变异系数愈小，混凝土的质量愈稳定，生产水平愈高。根据国家标准规定，混凝土是否合格，由根据GB/T 50080—2002取样留置的试件强度，经统计后评定来判定是否合格。混凝土的生产质量水平分为“合格”和“不合格”。

3. 混凝土的配制强度

由于混凝土施工过程中原材料性能及生产因素的差异，会出现混凝土质量的不稳定，如按设计强度等级配制混凝土，则按照混凝土强度的正态分布规律，在施工中将有约一半的混凝土达不到设计强度等级，强度保证率(即混凝土强度测试值达到或超过其设计等级标准值的百分比)只有 50%。为使混凝土强度保证率满足规定的要求，在设计混凝土配合比时，必须使配制强度(即平均强度)高于混凝土设计要求的强度，即 $f_{cu,o} \geqslant f_{cu,k}$，且两者相差越大，混凝土强度达到设计要求的保证率越高。根据《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ 55—2011)规定，工业与民用建筑及一般构筑物所采用施工中，为使混凝土强度保证率达到所要求的 95%，普通混凝土的配制强度须满足下式：

$$f_{cu,o} \geqslant f_{cu,k} + 1.645\sigma \tag{4-8}$$

式中 $f_{cu,o}$——混凝土的配制强度(MPa)；

$f_{cu,k}$——混凝土设计强度等级的抗压强度标准值(MPa)；

σ——施工单位混凝土强度标准差的历史统计水平(MPa)。

1.645——95%的强度保证率对应的概率参数(概率度)。

4.9.2 混凝土强度的检验与评定

《混凝土结构工程施工质量验收规范(2011 版)》(GB 50204—2002)规定，混凝土强度的检验，应以在混凝土浇筑地点制备并与结构实体同条件养护的试件强度为依据，必要时，可采用微(局部)破损与非破损方法检测混凝土强度。

《混凝土强度检验评定标准》(GB/T 50107—2010)规定，混凝土强度的评定可采用统计法和非统计法两种。统计方法适用于混凝土的生产条件能在较长时间内保持一致，且同一品种混凝土的强度变异性能保持稳定的情况，如预拌混凝土厂、预制混凝土构件厂和采用集中搅拌混凝土的施工单位所拌制的混凝土；非统计法适用于零星生产预制构件用混凝土或现场搅拌批量不大的混凝土。

目前，由于许多中小型工程属零星生产混凝土，现场留置混凝土试件数量有限(同一验收批混凝土试件不超过 10 组)，其合格性评定多采用非统计法。

$$m_{f_{cu}} \geqslant \lambda_3 \cdot f_{cu,k} \tag{4-9}$$

$$f_{cu,min} \geqslant \lambda_4 \cdot f_{cu,k} \tag{4-10}$$

式中 $m_{f_{cu}}$——同一验收批混凝土立方体抗压强度的平均值(MPa)；

$f_{cu,k}$——混凝土立方体抗压强度标准值，即该等级混凝土的抗压强度值(MPa)；

$f_{cu,min}$——同一验收批混凝土立方体抗压强度的最小值(MPa)。

对于系数 λ_3、λ_4 取值如表 4-12。

表 4-12 混凝土强度的非统计法合格评定系数

混凝土强度等级	＜C60	≥C60
λ_3	1.15	1.10
λ_4	0.95	

知识链接

混凝土的微破损与非破损检测

为了了解和控制混凝土结构和构件的施工质量，应按规范要求制作部分同条件养护的混凝土试件，通过破损性(抗压)试验来检验混凝土强度。但试件并不一定能准确地反映其所代表的混凝土实体构件的质量，特别是当混凝土实体结构出现质量缺陷(如空洞、严重露筋和开裂等)，工程技术人员对其强度合格性产生怀疑，而试件强度合格时，此时试件已无代表性可言，故常采用钻芯法或后装拔出法等微破损(又称局部破损)方法进行强度检验；另外，当预留混凝土试件强度评定为不合格时，也可采用微破损方法对实体混凝土结构进行进一步强度检验。而采用上述检验方法相对复杂，还会对构件带来一定的损伤，因此，工程技术人员希望尽量在不损伤混凝土构件的前提下，较为便捷地了解判断混凝土的质量，这样混凝土的非破损方法强度检验就具有非常实际的应用意义。

非破损方法强度检验主要有回弹法、超声波法和超声回弹综合法等。采用这些检验方法不仅不破坏构件，还可对结构物构件进行多次检验。非破损试验中以回弹法目前应用最为广泛。

回弹法是采用回弹仪进行试验，其基本原理是用有拉簧的一定尺寸的金属弹击杆，以一定的能量弹击在混凝土表面，根据弹击后弹杆的回弹距离可以测定被测混凝土的表面硬度，依据混凝土硬度与抗压强度之间的关系推算出强度。试验时操作人员手持回弹仪，将回弹仪冲杆垂直于混凝土表面，并徐徐地压入套筒，筒内弹簧逐渐压缩而储备能量，当弹簧压缩到一定程度后，弹簧即自动发射而推动冲杆冲击混凝土，冲杆头部受混凝土表面的反作用力而回弹，其回弹距离可从回弹仪的标尺上读出来(或从连接的数字式显示设备中精确读出)，然后根据回弹距离与抗压强度的关系(附于回弹法的试验规程中)推定出混凝土抗压强度。

需要特别指出的是，微破损和非破损方法的检测结果并不能完全代表混凝土的真实强度，而只是其推定强度，只能作为处理混凝土质量问题的依据之一。

4.10 普通混凝土配合比设计

混凝土配合比是指混凝土中各组成材料用量之间的比例关系。混凝土配合比通常用各种材料质量的比例关系表示。常用的表示方法有以下两种。

(1) 以每立方米混凝土中各种材料的质量来表示，如：胶凝材料 300kg，水 180kg，砂 720kg，石子 1 200kg。

(2) 以每立方米混凝土各组成材料的质量之比表示，如上例还可表示为：胶凝材料∶砂∶石子=1∶2.4∶4，水胶比 W/B=0.6。

4.10.1 混凝土配合比设计的准备

1. 混凝土配合比设计的基本要求

(1) 达到混凝土结构设计强度等级的要求。

(2) 满足混凝土施工所要求的施工性能(和易性)。

(3) 具有良好的耐久性，满足抗冻、抗渗、抗蚀等方面的要求。

(4) 在满足上述要求的前提下，尽量节约胶凝材料，满足经济性要求。

2. 混凝土配合比设计的参数

混凝土配合比设计，实质上就是确定胶凝材料、水、砂与石子这四项基本组成材料用量之间的 3 个比例关系。即水与胶凝材料之间的比例关系，常用水胶比表示；砂与石子之间的比例关系，常用砂率表示；胶浆与骨料之间的比例关系，常用单位用水量来表示。

确定水胶比、砂率、单位用水量这 3 个混凝土配合比重要参数的基本原则是：在满足混凝土强度和耐久性的基础上，确定混凝土的水胶比；在满足混凝土施工要求的和易性的基础上，根据粗骨料的种类和规格确定混凝土的单位用水量；以砂填充石子空隙后略有富余的原则来确定砂率。

3. 混凝土配合比设计的资料准备

在设计混凝土配合比之前，必须预先掌握下列基本资料。

(1) 混凝土强度要求，即混凝土设计强度等级。

(2) 混凝土耐久性要求，即根据混凝土所处环境条件所要求的抗冻等级及抗渗等级。

(3) 原材料情况，主要包括：胶结材料品种和实际强度、密度等；砂石品种、表观密度及堆积密度、含水率、级配、最大粒径、压碎指标值等；拌和用水的水质及水源；外加剂品种、特性、适宜剂量等。

(4) 施工条件及工程性质，主要包括搅拌和振捣方法、要求的坍落度、施工单位的施工管理水平、构件形状和尺寸以及钢筋的疏密程度等。

4.10.2 混凝土配合比设计的步骤

进行混凝土配合比设计，应首先按照已选择的原材料性能及对混凝土的技术要求进行初步理论计算，得出初步配合比；再经过实验室试拌及调整，得出基准配合比；然后经过强度检验(如有抗渗、抗冻等其他性能要求，应当进行相应的检验)，定出满足设计和施工要求并比较经济的设计配合比(实验室配合比)；最后根据现场砂、石的实际含水率，对实验室配合比进行调整，求出施工配合比。

1. 初步配合比计算

1) 确定混凝土的配制强度($f_{cu,o}$)

$$f_{cu,o}=f_{cu,k}+1.645\sigma \tag{4-11}$$

式中 $f_{cu,o}$——混凝土配制强度(MPa)；

$f_{cu,k}$——混凝土立方体抗压强度标准值(MPa)；

σ——混凝土强度标准差(MPa)。

混凝土强度标准差(σ)确定方法如下。

(1) 如施工单位具有近期同一品种混凝土强度统计资料时，σ可按照式(4-6)计算确定，注意式中 $n \geqslant 25$ 组。

(2) 如施工单位无历史统计资料时，见表 4-13。

表 4-13　混凝土标准差取值

混凝土强度等级	≤C20	C25～C45	C50～C55
σ /MPa	4.0	5.0	6.0

2) 确定水胶比(W/B)

(1) 根据强度要求计算水胶比。

采用经验公式(4-3)的变形公式计算满足强度要求的水胶比为：

$$\frac{W}{B}=\frac{\alpha_a f_b}{f_{cu,o}+\alpha_a\alpha_b f_b} \tag{4-12}$$

式中　$f_{cu,o}$——混凝土配制强度(MPa)；

α_a、α_b——回归系数(对碎石取α_a=0.53，α_b=0.20；对卵石取α_a=0.49，α_b=0.13)；

f_b——胶凝材料 28d 抗压强度实测值(MPa)。

知识链接

水泥厂为保证水泥出厂强度，所生产水泥的实际强度要高于其强度的标准值($f_{ce,k}$)，在无法取得水泥实际强度数据时，可用式 $f_{ce}=\gamma_c\cdot f_{ce,k}$，其中 γ_c 为水泥强度值的富余系数，可按实际统计资料或通过试验确定，若无资料和试验数据，则取 1.0。

(2) 根据施工规范中对最大允许水胶比的规定，查表 4-7 确定保证耐久性要求的最大允许水胶比，对所计算出的水胶比进行耐久性复核。

3) 确定单位用水量(m_{w0})

水胶比在 0.40～0.80 范围时，根据粗骨料的品种、粒径及施工要求的混凝土拌和物稠度，见表 4-14。

表 4-14　塑性和干硬性混凝土的用水量选用表

单位：kg/m^3

拌和物稠度		卵石最大粒径/mm				碎石最大粒径/mm			
项　目	指　标	10	20	31.5	40	16	20	31.5	40
坍落度/mm	10～30	190	170	160	150	200	185	175	165
	35～50	200	180	170	160	210	195	185	175
	55～70	210	190	180	170	220	205	195	185
	75～90	215	195	185	175	230	215	205	195
维勃稠度/s	16～20	175	160		145	180	170		155
	11～15	180	165		150	185	175		160
	5～15	185	170		155	190	180		165

注：(1)本表用水量是采用中砂时用水量的平均取值，采用细(粗)砂时，用水量可相应增(减)5～10kg/m^3。

(2)采用各种外加剂或掺和料时，用水量应相应进行调整。

4) 确定单位胶凝材料用量(m_{b0})，矿物掺合料用量(m_{f0})和水泥用量(m_{c0})

(1) 确定每立方米混凝土胶凝材料用量。

$$m_{b0} = \frac{m_{w0}}{W/B} \tag{4-13}$$

(2) 确定每立方米混凝土矿物掺合料用量(m_{f0})。

$$m_{f0} = m_{b0}\beta_f \tag{4-14}$$

式中 β_f——矿物掺合料掺量(%)。

(3) 确定每立方米混凝土水泥用量。

$$m_{c0} = m_{b0} - m_{f0} \tag{4-15}$$

查表 4-9 确定耐久性允许的最小胶凝材料用量，对所计算出的胶凝材料用量进行耐久性复核。

5) 确定砂率(β_s)

一般情况下，可根据粗骨料品种、粒径及水胶比见表 4-15。坍落度较大或较干硬混凝土的砂率，可经试验试配后确定。

表 4-15 混凝土的砂率

单位：%

水胶比/(*W*/*B*)	卵石最大粒径/mm			碎石最大粒径/mm		
	10	20	40	16	20	40
0.40	26～32	25～31	24～30	30～35	29～34	27～32
0.50	30～35	29～34	28～33	33～38	32～37	30～35
0.60	33～38	32～37	31～36	36～41	35～40	33～38
0.70	36～41	35～40	34～39	39～44	38～43	36～41

注：(1)本表数值系中砂的选用砂率，对细砂或粗砂，可相应减少或增大砂率。
(2)采用人工砂配制混凝土时，砂率可适当增大。
(3)只用一个单粒级粗骨料配置混凝土时，砂率应适当增大。

6) 计算单位粗，细骨料用量(m_{s0}、m_{g0})

砂石用量的计算有绝对体积法(体积法)及假定容重法(质量法)两种。

(1) 采用假定容重法时，按下式计算：

$$\begin{cases} m_{c0} + m_{f0} + m_{s0} + m_{g0} + m_{w0} = m_{cp} \\ \beta_s = m_{s0}/(m_{s0} + m_{g0}) \end{cases} \tag{4-16}$$

式中 m_{cp}——每立方米混凝土拌和物的假定质量，其值可取 2 350～2 450kg。

(2) 采用绝对体积法时，按下式计算：

$$\frac{m_{c0}}{\rho_c} + \frac{m_{f0}}{\rho_f} + \frac{m_{g0}}{\rho_g} + \frac{m_{s0}}{\rho_s} + \frac{m_{w0}}{\rho_w} + 0.01\alpha = 1 \tag{4-17}$$

式中 ρ_f、ρ_c、ρ_s、ρ_g、ρ_w——分别为掺合料密度、水泥密度、细集料的表观密度、粗集料的表观密度、水的密度(kg/m^3)；

α——混凝土含气量百分数(%)，不掺引气型外加剂时，取 1。

7) 得出初步配合比

将上述的计算结果表示为：m_{c0}、m_{s0}、m_{g0}、m_{w0} 或 m_{c0} ∶ m_{s0} ∶ m_{g0} ∶ m_{w0}。

2. 配合比的试配与调整

1) 基准配合比的确定

初步配合比中各材料用量是根据经验公式、经验数据计算而得的，是否能满足混凝土的设计要求还需要经试验来验证，即通过试配和调整来完成。

(1) 计算试配用量。根据粗骨料最大粒径确定试配混凝土用量。一般最大粒径 31.5mm 以下，试拌时取 15L；最大粒径≥40mm，试拌时取 25L。根据初步配合比，算出试配量中各组成材料的用量。

(2) 和易性检验与调整(确定基准配合比)。按计算量称取各材料进行试拌，搅拌均匀，测定其坍落度并观察黏聚性和保水性，如经试配坍落度不符合设计要求时，可做如下调整。

① 当坍落度比设计要求值大或小时，可以保持水胶比不变，相应的减少或增加胶浆用量。

② 当坍落度比要求值大时，除上述方法外，还可以在保持砂率不变的情况下，增加集料用量。

③ 若坍落度值大且拌和物黏聚性、保水性差时，可减少胶浆、增大砂率(保持砂石总量不变，增加砂用量，相应减少粗骨料用量)。

这样重复测试，直至符合要求为止。而后测出混凝土拌和物实测湿表观密度 $\rho_{c,t}$，并计算出 1m^3 混凝土中各拌和物的实际用量。然后提出和易性已满足要求的供检验混凝土强度用的基准配合比 m_{fa}、m_{ca}、m_{sa}、m_{ga}、m_{wa}。

2) 实验室配合比的确定

混凝土和易性满足要求后，还应复核混凝土强度并修正配合比。

(1) 强度复核。复核检验混凝土强度时至少应采用 3 个不同水胶比的配合比，其中一个为基准配合比，另两个配合比是以基准配合比的水胶比为准，在此基础上水胶比分别增加和减少 0.05，其用水量不变，砂率值可增加和减少 1%，试拌并调整，使和易性满足要求后，测出其实测湿表观密度，每种配合比至少制作一组(3 块)试件，标准养护 28d 后测定抗压强度。

(2) 配合比调整应符合下列规定

① 绘制出强度与胶水比的线性关系图或插值法确定略大于配制强度的强度对应的胶水比。

② 在试拌配合比的基础上，用水量(m_w)和外加剂用量(m_a)应根据确定的水胶比作调整；

③ 胶凝材料用量(m_b)应以用水量乘以确定的胶水比计算得出；

④ 粗骨料和细骨料用量(m_g 和 m_s)应根据用水量和胶凝材料用量进行确定。

(3) 按混凝土实测表观密度修正配合比。可按下式求校正系数 δ 值：

$$\rho_{c,c} = m_{cb} + m_{fb} + m_{sb} + m_{gb} + m_{wb} \tag{4-18}$$

$$\delta = \frac{\rho_{c,t}}{\rho_{c,c}} \tag{4-19}$$

式中　δ——混凝土配合比校正系数；

$\rho_{c,t}$——混凝土拌和物表观密度实测值(kg/m^3)；

$\rho_{c,c}$——混凝土拌和物表观密度计算值(kg/m^3)；

m_{cb}、m_{fb}、m_{sb}、m_{gb}、m_{wb}——按强度复核情况修正后的水泥、矿物掺合料、细骨料、粗骨料、水的用量。

当 $\rho_{c,t}$ 与 $\rho_{c,c}$ 之差不超过 $\rho_{c,c}$ 的 2%时，则不需按混凝土实测表观密度修正配合比；当两者之差超过 $\rho_{c,c}$ 的 2%时，混凝土配合比中每项材料用量均乘以修正系数 δ，即得到最终确定的设计配合比(即实验室配合比)。

3) 施工配合比的确定

上述设计配合比中材料是以干燥状态为基准计算出来的，而施工现场砂石常含一定量水分，并且含水率经常变化，为保证混凝土质量，应根据现场砂石含水率对实验室配合比设计值进行修正。修正后的配合比，称为施工配合比。

假定施工现场存放砂的含水率为 a%，石子的含水率为 b%，可通过下式计算，将实验室配合比中各材料用量 m_{cb}、m_{fb}、m_{sb}、m_{gb}、m_{wb} 换算为施工配合比各材料用量 m_c、m_f、m_s、m_g、m_w。

$$\left.\begin{aligned} m_c &= m_{cb} \\ m_f &= m_{fb} \\ m_s &= m_{sb}(1+a\%) \\ m_g &= m_{gb}(1+b\%) \\ m_w &= m_{wb} - a\% m_{sb} - b\% m_{gb} \end{aligned}\right\} \tag{4-20}$$

4.10.3 混凝土配合比设计实例

某教学楼的钢筋混凝土梁，设计强度等级为 C30，不受风雪影响，施工要求坍落度为 30～50mm，施工单位无同类混凝土质量的历史统计资料，生产质量水平优良，混凝土施工采用机械拌和、机械振捣。试设计混凝土的配合比，采用原材料如下。

水泥：强度等级为 42.5 的普通硅酸盐水泥，ρ_c=3 100kg/m^3。

砂：中砂，ρ_s=2 650kg/m^3，ρ_{0s}=1 500kg/m^3，施工现场砂含水率为 3%。

石子：碎石，ρ_g=2 700kg/m^3，ρ_{0g}=1 600kg/m^3，粒径范围 5～40mm，施工现场石子含水率为 1%。

水：自来水，不掺外加剂。

解：(1) 混凝土的配制强度($f_{cu,o}$)。

标准差取 5.0 MPa，则：

$$f_{cu,o}=f_{cu,k}+1.645\sigma=(30+1.645\times5.0)\text{MPa}=38.2\text{MPa}$$

(2) 计算水胶比。

$$W/B=(0.46\times42.5\times1.11)/(38.2+0.46\times0.07\times42.5\times1.11)=0.55$$

查表 4-7，$[W/B]_{max}$=0.6＞0.55，水胶比满足耐久性要求。

(3) 确定单位用水量(m_{w0})。

混凝土坍落度为 30～50mm，碎石最大粒径为 40mm，查表 4-11，得 m_{w0}=175kg。

(4) 计算水泥用量(m_{c0})。

$$m_{c0}=(175/0.55)\text{kg}=318\text{kg}$$

查表 4-7，$[m_{c0}]$min=260kg＜318kg，水泥用量满足耐久性的要求。

(5) 确定砂率(β_s)。

查表 4-12，当 W/B=0.55，最大粒径为 40mm 时，β_s=32%～37%，取 β_s=35%。

(6) 计算砂、石用量(m_{s0}、m_{g0})。

① 体积法。

$$\begin{cases}(318/3100)+(m_{s0}/2\,650)+(m_{g0}/2\,700)+(175/1\,000)+0.01=1\\0.35=m_{s0}/m_{s0}+m_{g0}\end{cases}$$

以上联立方程得：m_{s0}=669kg；m_{g0}=1 242kg。

② 质量法。

$$\begin{cases}318+m_{s0}+m_{g0}+175=2\,400\\0.35=m_{s0}/m_{s0}+m_{g0}\end{cases}$$

解以上联立方程得：m_{s0}=668kg；m_{g0}=1 240kg。

(7) 初步配合比。

按体积法的计算结果，初步配合比的各种材料用量为：m_{c0}=318kg；m_{w0}=175kg；m_{s0}=669kg；m_{g0}=1 242kg。

(8) 试拌与调整。

① 试拌用量。

石子最大粒径为 40mm，混凝土拌和物数量取 25L，材料用量见表 4-16。

表 4-16　拌 25L 混凝土各种材料用量

材料名称	水泥	水	砂	石
用量/kg	7.95	4.38	16.73	31.05

② 和易性测定与调整。

经试验测得坍落度值大于 30～50mm，故保持 W/C=0.55 不变，减少水泥浆数量 4%后，测得坍落度为 42mm，满足要求，黏聚性、保水性均良好。实测混凝土拌和物的表观密度为 ρ_0=2 415kg/m^3。

经调整后，拌 25L 混凝土中各种材料用量(即 25L 混凝土用量的基准配合比)为：

$$m_{ca}=[7.95\times(1-0.04)]\text{kg}=7.63\text{kg}$$
$$m_{wa}=[4.38\times(1-0.04)]\text{kg}=4.20\text{kg}$$
$$m_{sa}=16.73\text{kg}$$
$$m_{ga}=31.05\text{kg}$$

③ 强度复核。

在基准配合比的基础上，保持用水量不变，增加和减少水胶比 0.05，即按水胶比为 0.55、0.6、0.65 试拌 3 组混凝土。经测试，其和易性均满足要求，制成立方体试件。经标准养护 28d 后，测得其强度值见表 4-17。

表 4-17　不同水胶比的混凝土立方体抗压强度

水胶比 W/B	灰水比 B/W	混凝土立方体抗压强度 f_{cu}/MPa
0.50	2.0	43.0

续表

水胶比 W/B	灰水比 B/W	混凝土立方体抗压强度 f_{cu}/MPa
0.55	1.82	39.0
0.60	1.67	35.0

绘制强度与胶水比关系曲线，如图 4.17 所示。从图中查得立方体抗压强度为 38.2MPa 时，对应的灰水比为 B/W=1.79，水胶比 W/B=0.56。

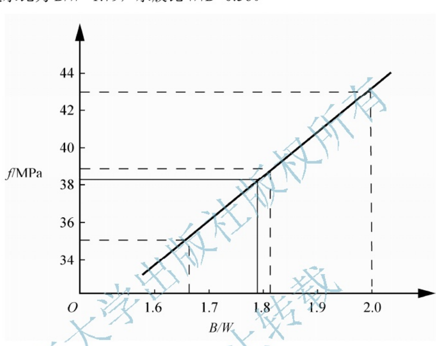


图 4.17 强度与胶水比的关系

(9) 确定实验室配合比。

① 按强度检验结果修正配合比。

a．用水量(m_{wb})。

$$m_{wb}=[4.20\times2\,415/(7\text{-}63+4.20+16.73+31.05)]\text{kg}=170\text{kg}$$

b．水泥用量(m_{cb})。

$$m_{cb}=[170/0.56]\text{kg}=304\text{kg}$$

c．砂、石用量(m_{sb}、m_{gb})。

砂：$m_{sb}=[16.73\times2\,415/(7\text{-}63+4.20+16.73+31.05)]\text{kg}=678\text{kg}$

石子：$m_{gb}=[31.05\times2\,415/(7\text{-}63+4.20+16.73+31.05)]\text{kg}=1\,258\text{kg}$

② 按实测表观密度修正配合比。按强度符合要求的配合比试拌混凝土，其混凝土表观密度实测值为：$\rho_{c,t}=2\,421\text{kg/m}^3$。

混凝土表观密度计算值为：

$$\rho_{c,c}=m_{cb}+m_{sb}+m_{gb}+m_{wb}=[170+304+678+1\,278]\text{kg/m}^3=2\,430\text{kg/m}^3$$

校正系数：

$$\delta=\rho_{c,t}/\rho_{c,c}=2\,421/2\,430=0.996\,3$$

③ 计算实验室配合比。由于混凝土表观密度实测值与混凝土表观密度计算值之差不到1%，故不必修正。混凝土的试验室配合比见表 4-18。

表 4-18　混凝土的试验室配合比

材料名称	水泥	水	砂	石
用量/kg	304	170	678	1258

(10) 确定施工配合比。

根据实测砂石含水率换算成施工配合比。

$m_c=m_{cb}=304\text{kg}$

$m_s=m_{sb}(1+a\%)=[678\times(1+3\%)]\text{kg}=698\text{kg}$

$m_g=m_{gb}(1+b\%)=[1\,258\times(1+1\%)]\text{kg}=1\,271\text{kg}$

$m_w=m_{wb}-a\%m_{sb}-b\%m_{gb}=[170-678\times3\%-1258\times1\%]\text{kg}=137\text{kg}$

4.11　其他品种混凝土

现代土木工程对混凝土性能的要求越来越趋向于专项性，要求混凝土不仅应具有基本的性能，同时还可以具有直接针对工程性质的特种性能，由此便在普通水泥混凝土的基础上，发展出了各种具有不同性能特点的混凝土。

4.11.1　高强混凝土与高性能混凝土

1. 高强混凝土

1) 概念

高强混凝土(High Strength Concrete，HSC)是指强度等级为 C60 及其以上的混凝土，C100 以上也称超高强混凝土。

2) 特性

高强混凝土具有强度高、空隙率低、抗渗性好、耐久性好等优点，在建筑工程特别是高层建筑中被广泛采用。高强混凝土能适应现代工程的需要，可获得明显的工程效益和经济效益。采用高强混凝土，不仅可以减少结构断面尺寸、减轻结构自重、降低材料费用，还能满足特种工程的要求，在高层超高层建筑、建筑结构、大跨度大型桥梁结构、道路以及受有侵蚀介质作用的车库、贮灌物中及某些特种结构中得到广泛应用。但是，与普通混凝土相比，高强混凝土的耐火性能较差，特别是火灾中的抗爆裂性能较差。由于强度太高带来的脆性问题尚未从根本上解决，因此，目前在使用高强混凝土方面仍有一定限制。

高强混凝土的组成材料除主要包括的水泥、砂、石外，还有化学外加剂、矿物掺和料和水或同时外加粉煤灰、F 矿粉、矿渣、硅粉等混合料，经常规工艺生产而获得高强度的混凝土。

特别提示

由于高强混凝土要掺入超细矿物掺和料，因此配合比设计中的重要参数采用水胶比(即用水量与胶凝材料总量的比值)。

知识链接

各国对高强混凝土与普通混凝土的划分不尽相同，高强混凝土或普通混凝土是与本国当前的混凝土技术水平相对而言的。长期以来，我国现场施工现浇混凝土的强度等级大量低于C30，预制混凝土构件普遍低于C40；同时混凝土结构设计规范的计算公式大部分是根据较低强度的混凝土构件的试验数据得出的，有的明显不适合于强度较高或更高等级的混凝土；另外从混凝土的制作技术来看，C50及更高等级的混凝土在施工时需要严格的质量管理制度和较高的施工技术水平。因此，从我国目前的设计施工技术水平出发，划分强度等级达到或超过C60的混凝土为高强混凝土；相对而言，将强度等级不高于C25的混凝土为低强混凝土，C30～C45之间的混凝土为中强混凝土。

3) 施工与养护

高强混凝土从原料到搅拌、浇筑、养护等，要求有严格的施工程序，如不得使用自落式搅拌机，严禁在拌和物出机时加水、外加剂宜采用后掺法、采用“二次投料法”搅拌工艺等。目前，高强混凝土多数以商品混凝土的形式供应，在现场采用泵送的施工方法。由于高强混凝土用水量较少，保湿养护对混凝土的强度发展、避免过多地产生裂缝、获得良好的质量具有重要影响，因而应在浇注完毕后，立即覆盖养护或立即喷洒或涂刷养护剂以保持混凝土表面湿润，养护日期不得少于7d。

2. 高性能混凝土

1) 概念

高性能混凝土(High Performance Concrete，HPC)是一种新型高技术混凝土，是在大幅度提高普通混凝土性能的基础上采用现代混凝土技术制作的混凝土。它以耐久性作为设计的主要指标。

2) 特性

高性能混凝土是具备所要求的性能和匀质性的混凝土，其所要求的性能包括：易于浇注和压实而不离析、高长期力学性能、高早期强度、高韧性、体积稳定、在严酷环境下使用寿命长久。针对不同用途要求，对下列性能重点予以保证：耐久性、工作性、适用性、强度、体积稳定性和经济性。高性能混凝土具有一定的强度和高抗渗能力，但不一定具有高强度，中、低强度亦可；与普通混凝土相比，高性能混凝土具有独特的性能，即高工作性、高耐久性和高体积稳定性。

知识链接

京沪高速铁路是我国第一条具有自主知识产权的高速铁路，设计时速350km。该工程主要混凝土结构使用年限按不低于100年设计，同时对混凝土结构的耐久性提出了很高的要求，大掺量矿物掺和料高性能混凝土在京沪高铁中的大量应用也取得了良好的效果。

特别提示

高性能混凝土不一定是高强度混凝土，高性能混凝土的技术性能要求比高强混凝土更多、更广泛。

4.11.2 轻混凝土

轻混凝土是其体积密度小于 2 000kg/m^3 混凝土的统称。它是用轻的粗、细骨料和水泥，必要时加入化学外加剂的矿物掺和料配制成的混凝土。

轻混凝土按其孔隙结构分为轻骨料混凝土(即多孔骨料轻混凝土)、多孔混凝土(主要包括加气混凝土和泡沫混凝土等)和大孔混凝土(即无砂混凝土或少砂混凝土)。与普通混凝土相比，其特点是质轻、热工性能良好、力学性能良好、耐火、抗渗、抗冻、易于加工等。因此，在高层建筑、大跨度建筑、有保温要求的建筑装饰与装修工程中具有明显优势。

1. 轻骨料混凝土

以轻粗骨料、细骨料、水泥和水配制而成。与普通混凝土比较，其表观密度较低、强度差别不大，具有较高的比强度。

1) 分类

轻骨料按其来源可分为工业废料轻骨料(如粉煤灰陶粒、煤矸石、膨胀矿渣珠、煤渣等)、天然轻骨料(如浮石、火山渣等)以及人造轻骨料(如页岩陶粒、黏土陶粒、膨胀珍珠岩等)；按其颗粒形状可分为圆球形、普通型和碎石型；按所用骨料不同可分为全轻混凝土(粗细骨料均为轻骨料，堆积密度小于 1 000kg/m^3)和砂轻混凝土(细骨料全部或部分为普通砂)；按用途可分为保温轻骨料混凝土、结构保温轻骨料混凝土、结构轻骨料混凝土 3 大类。

轻骨料混凝土按用途及其对强度等级和密度等级的要求见表 4-19。

表 4-19 轻骨料混凝土用途及其对强度等级和密度等级的要求

类别名称	混凝土强度等级的合理范围	混凝土密度等级的合理范围	用　　途
保温轻骨料混凝土	LC5.0	≤800	主要用于保温的围护结构或热工构筑物
结构保温轻骨料混凝土	LC5.0～LC15	800～1 400	主要用于既承重又保温的围护结构
结构轻骨料混凝土	LC15～LC60	1 400～1 900	主要用于承重构件或构筑物

2) 技术性能

(1) 抗压强度。轻骨料混凝土的强度等级用 LC 表示。轻骨料混凝土的强度等级与普通混凝土相对应，《轻骨料混凝土技术规程(附条文说明)》(JGJ 51—2002)按其立方体抗压强度标准值划分为 13 个强度等级：LC5.0、LC7.5、LC10、LC15、LC20、LC25、LC30、LC35、LC40、LC45、LC50、LC55、LC60。强度等级达到 LC30 及以上者称为高强轻骨料混凝土。

(2) 体积密度。轻骨料混凝土按其干体积密度划分为 14 个密度等级，即由 600～1 900 每增加 100kg/m^2 为一个等级，每一个等级有其一定的变化范围。某一密度等级轻骨料混凝土的密度标准值，可取该密度等级于表观密度变化范围的上限值，见表 4-20。

表 4-20 轻骨料混凝土的密度等级

密度等级	干表观密度变化范围/(kg/m³)	密度等级	干表观密度变化范围/(kg/m³)
600	560～650	1 300	1 260～1 350
700	660～750	1 400	1 360～1 450
800	760～850	1 500	1 460～1 550
900	860～950	1 600	1 560～1 650
1 000	960～4 050	1 700	1 660～1 750
1 100	1 060～1 150	1 800	1 760～1 850
1 200	1 160～1 250	1 900	1 860～1 950

(3) 其他性能。轻骨料的弹性模量较小，一般为同强度等级普通混凝土的 50%～70%；轻骨料混凝土具有良好的保温性能，当含水率增大时，导热系数也随之增大；轻骨料的收缩和徐变比普通混凝土相应大 30%～60%，热膨胀系数比普通混凝土小约 20%，导热系数降低 25%～75%，耐火性与抗冻性有不同程度的改善。

3) 轻骨料混凝土的应用

轻骨料混凝土主要适用于高层和多层建筑、软土地基、大跨度结构、抗震结构、耐火等级要求高的建筑、要求节能的建筑和旧建筑的加层等。

知识链接

自 20 世纪 50 年代中期，美国采用轻骨料混凝土取代普通混凝土，修建了休斯敦贝壳广场大厦，并取得了显著的技术经济效益，使得高性能轻骨料混凝土越来越受到了重视。如今，国外发达国家高强度、高性能轻骨料混凝土的应用已经取得了丰富的经验。LC50～LC60 轻骨料混凝土已在工程中大量使用，结构轻骨料混凝土的抗压强度最高为 80 MPa，其表观密度不大于 1 800 或 2 000kg/m³。1993 年以来，美国每年轻骨料使用量约为 350～415 万 m³，其中结构用轻骨料混凝土部分在 80 万 m³ 左右。挪威自 1987 年以来，已应用高性能轻骨料混凝土施工了 11 座桥梁，用于 6 座主跨为 154～301m 的悬臂桥的主跨或边跨，2 座斜拉桥的主跨或桥面，2 座浮桥的桥墩，1 座桥的桥面板。

轻骨料混凝土在我国应用的工程实例较多，如建于 2000 年的珠海国际会议中心 20 层以上部位全都采用 LC40 轻骨料混凝土；铁道部大桥局桥梁科技研究所将 LC40 粉煤灰陶粒高强混凝土成功应用于金山公路跨度为 22m 的箱形预应力桥梁，使桥梁的自重降低了 20%以上，取得了很好的技术经济效果。

2. 大孔混凝土

大孔混凝土是以粗骨料、水泥和水配制而成的一种轻质混凝土，又称无砂混凝土。在这种混凝土中，水泥浆包裹粗骨料颗粒的表面，将粗骨料粘在一起，但水泥浆并不填满粗骨料颗粒之间的空隙，因而形成大孔结构的混凝土。

大孔混凝土按其所用骨料品种可分为普通大孔混凝土和轻骨料大孔混凝土。前者用天

然碎石、卵石或重矿渣配制而成。为了提高大孔混凝土的强度，有时也加入少量细骨料(砂)，这种混凝土又称少砂混凝土。

普通大孔混凝土体积密度为 1 500～1 950kg/m^3，抗压强度为 3.5～10MPa。轻骨料大孔混凝土的体积密度在 500～1 500kg/m^3，抗压强度为 1.5～7.5MPa。大孔混凝土热导率小，保温性能好，吸湿性小，收缩一般比普通混凝土小 30%～50%，抗冻性可达 15～25 次冬融循环。由于大孔混凝土不用或少用砂，故水泥用量较低，1m^3 混凝土的水泥用量仅为 150～200kg，成本较低。

大孔混凝土可用于制作墙体用的小型空心砌块和各种板材，也可用于现浇墙体。普通大孔混凝土还可制成给水管道、滤水板等，广泛用于市政工程。

3. 多孔混凝土

多孔混凝土是一种不用粗骨料，且内部均匀分布着大量微小气孔的轻质混凝土。多孔混凝土孔隙率可达 85%，体积密度在 300～1 000kg/m^3，热导率为 0.081～0.17W/(m・K)，且具有结构及保温功能，容易切割，易于施工。可制成砌块、墙板、屋面板及保温制品，广范用于工业与民用建筑及保温工程中。

根据气孔产生的方法不同，多孔混凝土可分为加气混凝土和泡沫混凝土。蒸压加气混凝土砌块适用于承重和非承重的内墙和外墙。加气混凝土条板用于工业与民用建筑中，可做承重和保温合一的屋面板和墙板，条板均配有钢筋，钢筋必须预先经防锈处理。另外，还可用加气混凝土和普通混凝土预制成复合墙板，用作外墙板。加气混凝土还可做成各种保温制品，如管道保温壳等。

特别提示

蒸压加气混凝土的吸水率高，且强度较低，所以其所用砌筑砂浆及抹面砂浆与砌筑砖墙时不同，需专门配制。

4.11.3 防水混凝土

防水混凝土是通过各种方法提高混凝土抗渗性能，其抗渗等级等于或大于 P6 级的混凝土，又称抗渗混凝土。混凝土抗渗等级的选择是根据其最大作用水头(即处在自由水面下的垂直深度)与建筑物最小壁厚的比值来确定的，见表 4-21。

表 4-21 防水混凝土抗渗等级选择

最大作用水头与建筑物最小壁厚的比值	＜10	10～20	＞20
混凝土设计抗渗等级	P6	P8	P10～P20

特别提示

混凝土试配要求的抗渗水压值应比设计等级值高 0.2MPa。

防水混凝土根据采取的防渗措施不同，分为三类：普通防水混凝土、外加剂防水混凝土和膨胀水泥防水混凝土。

1. 普通防水混凝土

普通防水混凝土通过调整配合比来提高混凝土自身的密实度，从而提高混凝土的抗渗性。普通防水混凝土在配合比设计时，对其所用的原材料要求除应与普通混凝土相同外，还应符合以下规定：1m^3 混凝土中的水泥和矿物掺和总量不宜小于 320kg；砂率宜为 35%～45%；抗渗混凝土最大水胶比，见表 4-22。

表 4-22　抗渗混凝土最大水胶比

抗渗等级	最大水胶比	
	C20～C30 混凝土	C30 以上混凝土
P6	0.60	0.55
P8～P12	0.55	0.50
P12 以上	0.55	0.45

普通防水混凝土的抗渗等级一般可达 P6～P12，施工简单，性能稳定，但施工质量要求比普通混凝土严格，适用于地上、地下要求防水抗渗的工程。

2. 外加剂防水混凝土

外加剂防水混凝土是利用外加剂的功能，使混凝土显著提高密实性或改变孔结构，从而达到抗渗的目的。常用的外加剂有引气剂(松香热聚物、松香皂和氯化钙复合剂)、密实剂(氢氧化铁、氢氧化铝)、防水剂(氯化铁)等。

3. 膨胀水泥防水混凝土

膨胀水泥防水混凝土采用膨胀水泥配制而成，由于这种水泥在水化过程中能形成大量的钙矾石，会产生一定的体积膨胀，在有约束的条件下能改善混凝土的孔结构，使毛细孔径减小，总孔隙率降低，从而使混凝土密实度提高，抗渗性能提高。但这种防水混凝土使用温度不应超过 80℃，否则将导致抗渗性能下降。

4.11.4　流态混凝土

在预拌的坍落度为 50～100mm 的基体混凝土中，在浇筑之前掺入适量的流化剂，经过 1～5min 的搅拌，使混凝土的坍落度迅速增大至 200～220mm，拌和物甚至能像水一样地流动，这种混凝土称为“流态混凝土”。流态混凝土的特点包括以下几方面。

(1) 混凝土拌和物坍落度增幅大，但不会离析、泌水等，有利于泵送。

(2) 水胶比小，不需要多用水泥，且宜制得高强、耐久、不透水的优质混凝土。

(3) 改善混凝土施工性能，可显著减少混凝土浇筑、振捣所耗动力，降低工程造价。

(4) 大大改善混凝土施工条件，减少劳动量，提高工效，减小施工噪声。

(5) 因其单位用水量少，硫化及硫化剂对水泥的分散效果随时间延长而降低，因此流态混凝土拌和物的坍落度经时损失快。

流态混凝土近年来开始在大型工程中使用，主要适用于高层建筑、大型工业与公共建筑的基础、楼板、墙板以及地下工程等，尤其使用于工程中配筋密列混凝土浇筑振捣困难的部位，以及导管法浇注混凝土。

4.11.5 环保型混凝土

所谓环保型混凝土，是指能减少给自然环境造成负荷，同时又能与自然生态系统协调共生，为人类构筑更加舒适环境的混凝土。由于传统混凝土存在诸多对环境不利的缺点、不符合可持续发展的要求。因此，环保型混凝土便应运而生，其品种也在不断出新。环保型混凝土有两大类：一类是减轻环境负荷的混凝土；另一类是生态型混凝土。

(1) 减轻环境负荷的混凝土是指在混凝土生产、使用直到解体全过程中，能够减轻给地球环境造成的负担的混凝土。有关这类混凝土的开发与研究，在中国已有几十年的历史，从利用高炉矿渣、粉煤灰等工业废料作为水泥的混合材料、混凝土的掺和料，到开发利用高流态、自密实、高性能混凝土，均属于减轻环境负荷型混凝土。

(2) 生态型混凝土是指能适应动植物生长，对调节生态平衡、美化环境景观、实现人类与自然的协调具有积极作用的混凝土。有关这类混凝土的研究和开发还刚起步，它的目标是：混凝土不仅仅作为建筑材料为人类构筑所需要的结构物或建筑物，而且它应与自然融合，对自然环境和生态平衡具有积极的保护作用。其主要品种有透水、排水型混凝土，生物适应型混凝土，绿化植被混凝土和景观混凝土等。

知识链接

所谓绿化混凝土，是指能够适应植物生长、可进行植被作业的混凝土及其制品，具有保护环境、改善生态条件、基本保持原有防护作用的3大功能。绿化混凝土可再造自然水环境、维护水生态链、增加护砌材料表面透水透气性、减少城市热岛效应，还能减少水泥用量，对生态平衡起到积极作用。其典型代表是混凝土草坪砖，这种地砖采用火山岩骨料制作，不仅含有草种生长所需的养分，其间还有足够的孔隙，既能保证草根在混凝土生长中有充分的延展空间，也可避免草根的生长导致混凝土地砖的破裂，铺上这种地砖，只需浇水并定期添加营养液，就能保持绿草如茵。与一般草坪相比，混凝土草坪最大的优点就是耐压，它可以承受500～2 000kN/m^2的重压，由于其草根深扎于混凝土缝隙中而受到保护，所以不怕人踩。不怕车轧，用于铺设大型室外停车场或其他公共聚会场所，既可绿化又可停车，一举两得，可有效缓解当前城市绿化与城市用地紧张之间的矛盾。

4.11.6 自密实混凝土

自密实混凝土指具有高流动性、均匀性和稳定性，浇筑时无需外力振捣，能够在自重作用下流动并充满模板空间的混凝土，即使存在致密钢筋也能完全填充模板，同时获得很好均质性，并且不需要附加振动的混凝土。

自密实混凝土被称为“近几十年中混凝土建筑技术最具革命性的发展”，因为自密实混凝土拥有众多优点。

(1) 保证混凝土良好地密实。

(2) 提高生产效率。由于不需要振捣，混凝土浇筑需要的时间大幅度缩短，工人劳动强度大幅度降低，需要工人数量减少。

(3) 改善工作环境和安全性。没有振捣噪音，避免工人长时间手持振动器导致的“手臂振动综合症”。

(4) 改善混凝土的表面质量。不会出现表面气泡或蜂窝麻面，不需要进行表面修补；能够逼真呈现模板表面的纹理或造型。

(5) 增加了结构设计的自由度。不需要振捣，可以浇筑成型形状复杂、薄壁和密集配筋的结构。以前，这类结构往往因为混凝土浇筑施工的困难而限制采用。

(6) 避免了振捣对模板产生的磨损。

(7) 减少混凝土对搅拌机的磨损。

(8) 可能降低工程整体造价。从提高施工速度、环境对噪音限制、减少人工和保证质量等诸多方面降低成本。

自密实混凝土的“自密实”特性的测试，已经形成了系列标准的试验方法，见表4-23。

表4-23　自密实混凝土拌合物的自密实性能及要求

自密实性能	性能指标	性能等级	技术要求
填充性	坍落扩展度/mm	SF1	550～655
		SF2	660～755
		SF3	760～850
	扩展时间 T_{500}/s	VS1	≥2
		VS2	＜2
间隙通过性	坍落扩展度与J环扩展度差值/mm	PA1	25＜PA1≤50
		PA2	0≤PA2≤25
抗离析性	离析率/%	SR1	≤20
		SR2	≤15
	粗骨料振动离析率/%	f_m	≤10

注：当抗离析性结果有争议时，以离析率筛析法试验结果为准。

知识链接

在20世纪70年代早期，欧洲就已经开始使用轻微振动的混凝土，但是直到20世纪80年代后期，SCC才在日本发展起来。日本发展SCC的主要原因是解决熟练技术工人的减少和混凝土结构耐久性提高之间的矛盾。欧洲在20世纪90年代中期才将SCC第一次用于瑞典的交通网络民用工程上。随后EC建立了一个多国合作SCC指导项目。从此以后，整个欧洲的SCC应用普遍增加。

本任务小结

通过本任务的学习，应掌握新拌混凝土的和易性、硬化混凝土的力学性能、耐久性要求、强度检验方法和混凝土质量控制、外加剂特点等内容。

在混凝土组成材料中，水泥胶结材料是最关键的成分，对混凝土性能影响很大。砂和石子

是同一性状而只是粒径不同的骨料，而所起的作用基本相同，应掌握它们在配制混凝土时的技术要求。

混凝土的和易性对混凝土硬化后的性能(强度和耐久性)有极大影响，必须保证混凝土拌和物的施工性能。混凝土强度的合格性控制与建筑施工关系密切，应结合主体(基础)工程施工、施工质量验收等课程深入学习。

要求基本掌握混凝土配合比计算及调整方法，了解水胶比、砂率、单位用水量及其他一些常见因素对混凝土性能的影响。同时应当明确，配合比设计的合理性必须通过试验来检验。

外加剂已成为改善混凝土性能的非常有效的措施，在国内外得到了广泛应用，被视为组成混凝土的第五种组成材料。应着重了解它们的类别、性质和使用条件。

其他品种的混凝土在工程中的应用已日趋广泛。这些混凝土的品种不同，性能、特点各异，分别适用于不同的环境要求，在实际工程中应合理选用。

掌握普通混凝土的基本性质，既是本课程的重点，也是了解其他品种混凝土和建筑砂浆性质的基础。



习 题

一、简答题

1．普通混凝土的组成材料有哪几种？在混凝土凝固硬化前后各起什么作用？

2．什么是骨料级配？混凝土骨料为什么要检测其级配？骨料级配良好的标准是什么？

3．什么是混凝土拌和物的和易性？它有哪些含义？影响混凝土拌和物和易性的因素有哪些？如何影响？

4．什么是合理砂率？合理砂率有何技术及经济意义？

5．采取哪些措施可提高混凝土早期强度(1～3d)？哪些措施可提高混凝土28d强度？

6．引起混凝土产生变形的因素有哪些？采取什么措施可减小混凝土的变形？

7．采取哪些措施可提高混凝土的抗渗性？抗渗性大小对混凝土耐久性的其他方面有何影响？

8．轻骨料混凝土与普通混凝土相比较有何特点？

9．常用的早强剂有哪些？试评价其优缺点。

10．为什么提高现场混凝土施工管理水平可降低混凝土施工生产成本？

11．混凝土配合比设计的基本要求是什么？需要确定的三个参数是什么？怎样确定？

12．简述普通水泥混凝土的配合比设计步骤。

13．简述减水剂的作用机理和掺入减水剂的技术经济效果。

14．试述高性能混凝土的主要特点。

二、案例题

1．采用矿渣水泥、5～31.5mm碎石和天然中砂配制混凝土，水胶比为0.50，制作15cm×15cm×15cm试件3块，在标准养护条件下养护28d后，测得破坏荷载分别为895kN、950kN、905kN。试计算：

(1) 该混凝土28d的立方体抗压强度。

(2) 该混凝土采用的矿渣水泥的强度等级。

2．某混凝土配合比为 $C:S:G=1:2.43:4.71$，水胶比为0.62，设混凝土的表观密度为2 400kg/m^3，求各材料用量。

3．分析混凝土在下列情况下产生裂缝的机理，并指出主要防止措施。

(1) 水泥水化热大。

(2) 水泥安定性不良。

(3) 环境温度变化(温差)较大。

(4) 出现碱—骨料反应。

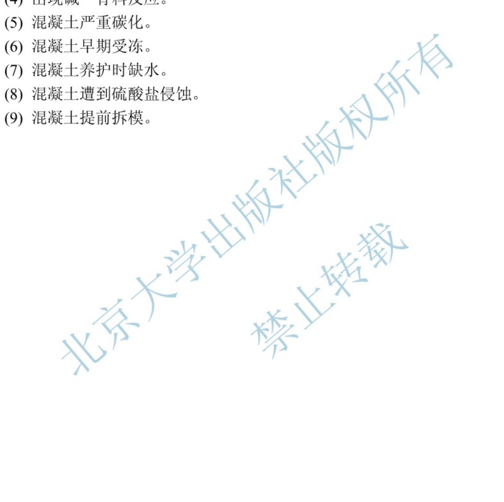
(5) 混凝土严重碳化。

(6) 混凝土早期受冻。

(7) 混凝土养护时缺水。

(8) 混凝土遭到硫酸盐侵蚀。

(9) 混凝土提前拆模。



学习任务 5

建筑砂浆

学习目标

掌握砌筑砂浆的材料组成和技术性质特点，了解砌筑砂浆的配合比设计过程，熟悉干混砂浆、特种砂浆和抹面砂浆的特点及应用。

学习要求

能力目标	知识要点	权重
了解砌筑砂浆材料组成	砌筑砂浆组成材料及特点	30%
掌握砌筑砂浆技术性质	砌筑砂浆技术性质与要求	40%
了解砌筑砂浆配合比设计过程	砌筑砂浆配合比设计程序	10%
熟悉干混砂浆、特种砂浆和抹面砂浆的特点及应用	干混砂浆、特种砂浆和抹面砂浆的特点及应用	20%

任务导读

砂浆在建筑工程中是用量大、用途广泛的建筑材料之一，它是由胶凝材料、细集料、掺和料和水配制而成的。砂浆可把散粒材料、块状材料、片状材料等胶结成整体结构，也可以装饰、保护主体材料。它与普通混凝土的主要区别是组成材料中没有粗骨料。因此，建筑砂浆也称为细骨料混凝土。

砂浆按用途不同可分为砌筑砂浆、抹面砂浆(图 5.1)、绝热砂浆和防水砂浆等；按胶结料不同可分为水泥砂浆、石灰砂浆、聚合物砂浆和混合砂浆等。

建筑砂浆的主要技术性质包括新拌砂浆的和易性，硬化后砂浆的强度、黏结性和收缩等。对于硬化后的砂浆则要求具有所需要的强度、与底面的黏结及较小的变形。



图 5.1　加气混凝土专用抹面砂浆



干混砂浆的发展

干混砂浆是在传统搅拌砂浆的基础上发展起来的，起源于 19 世纪的奥地利，直到 20 世纪 50 年代以后，欧洲的干混砂浆才得到迅速发展，主要原因是第二次世界大战后欧洲需要大量建设，劳动力的短缺、工程质量的提高以及环境保护要求，使人们开始对建筑干混砂浆进行系统研究和应用。到 60 年代，欧洲各国政府出台了建筑施工环境行业投资优惠等方面的导向性政策来推动建筑砂浆的发展，随后建筑干混砂浆很快风靡西方发达国家。近年来，环境质量要求更加提高了对建筑砂浆工业化生产的重视。

我国建筑砂浆完整经历了石灰砂浆、水泥砂浆、混合砂浆到干拌砂浆的发展历程，从 20 世纪 80 年代开始北京、上海等地开始引进研究干混砂浆技术，直到 90 年代末期才开始出现具有一定规模的干拌砂浆生产厂家(图 5.2 和图 5.3)。

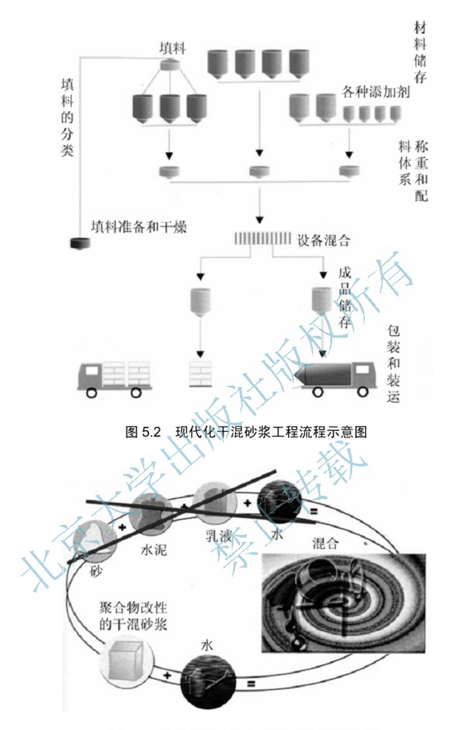


图 5.2　现代化干混砂浆工程流程示意图

图 5.3　传统搅拌砂浆与现代干混砂浆的区别



引　例

2002 年 11 月初，记者接到美庐锦园业主的投诉电话，反映尚未入住的美庐锦园外墙出现大面积裂纹，同时室内地面也有不少裂缝，如图 5.4 所示。记者随即赶赴现场，看到情况确实如此，只见有工人正在进行修补处理，裂纹涉及 A、B、C 这 3 栋楼，绝大部分已经重新刮上了腻子。据现场施工人员介绍，目前的处理办法是先用水泥砂浆将裂缝处抹平，再以涂料粉刷。

此后，陆续有许多业主向有关管理部门递交了投诉材料。11 月 8 日，市质监总站专门召集

施工、监理以及发展商就此事进行商讨，并责成当事方立即着手调查，并尽快找出裂纹原因及解决方案，送交质监总站审批。

记者了解到，许多业主非常担心裂纹会影响今后的生活，他们向发展商提出交涉：请说明该问题的出现原因以及是否会对外墙留下质量隐患，比如外墙防水问题、涂料脱落问题等；同样的问题在其他部位是否还会出现？有何预防措施？发展商的答复是：这是正常现象，绝对不会影响主体结构，而且他们会进行修补。深圳市建设工程质量监督总站发布了《美庐锦园工程质量投诉处理意见》。在《意见》中，给出了现场调查情况及处理意见：第一，外墙裂缝不是受力裂缝，主要为抹灰层收缩龟裂导致涂层裂缝，缝宽 0.2mm 以下，裂缝长度最长近 1m；第二，施工单位限期提出技术处理方案交设计单位审查，设计单位书面同意后，方可进行修补，处理外墙的颜色应均匀一致；第三，施工单位和监理单位全面检查水泥砂浆地面的空鼓、开裂情况，并写出相应的整改措施，交设计单位审查；第四，施工单位和监理单位应全面检查外墙裂缝，分析裂缝原因，总结经验，建设单位和监理单位做好业主的解释工作。



图 5.4　砂浆调配不准确产生的墙面裂缝

而据个别勘察过现场的专业人士透漏，裂缝产生的根本问题不在主体结构墙体上，而是出现在水泥砂浆抹灰这个工序上。他们认为具体的原因有如下几方面。

(1) 抹灰前有两道工序未做或未做到位：原主体结构墙面未清理干净、抹灰未甩毛，即未用掺 107 胶的素水泥浆甩到墙面。这将导致抹灰层空鼓(即抹灰层未能与主体结构墙体粘好)而出现裂缝。

(2) 水泥砂浆配合比不准确：配合比过高、过低均会导致抹灰裂缝。配合比不准确会使水泥砂浆施工初期水泥与水发生化学反应，而硬化时出现内部应力不均。

(3) 抹灰后，天气炎热、干燥，未洒水养护水泥砂浆层。

(4) 承建商、监理工程师、发展商的地盘管理人员均未认真履行“工序检查”就允许下道工序“刷涂料”施工。

5.1 砌筑砂浆

用于砖、石、砌块等黏结成为一体的砂浆，称为砌筑砂浆。如在砌体结构中，把单块的砖、石及砌块等胶结起来构成砌体；大型墙板和各种构件的接缝也可用砂浆填充；墙面、地面及梁柱结构的表面都可用砂浆抹面，以便满足装饰和保护结构的要求；镶贴大理石、瓷砖等使用的砂浆。它起着传递荷载的作用，是砌体的重要组成部分。

5.1.1 砌筑砂浆的组成材料

1. 水泥

用来配制砂浆水泥品种的选择与混凝土相同，可根据砌筑部位、环境条件等选择适宜的水泥品种。通常对水泥的强度要求并不是很高，一般采用中等强度等级的水泥就能够满足要求。在配制砌筑砂浆时，选择水泥强度等级一般为砂浆强度等级的4～5倍，但水泥砂浆采用的水泥强度等级不宜大于32.5，水泥混合砂浆采用的水泥强度等级不宜大于42.5级。如果水泥强度等级过高，可适当掺入掺加料。不同品种的水泥，不得混合使用。

在普通硅酸盐水泥熟料中掺入大量的炉渣、灰渣等物质，磨细后生产出砌筑水泥专门用于拌制砌筑砂浆。由于砌筑水泥中熟料的含量很少，一般为15%～25%，所以砌筑水泥的强度较低，通常分为125、175、225这3个标号。

2. 掺和料

为了改善砂浆的和易性和节约水泥、降低砂浆成本，在配制砂浆时，常在砂浆中掺入适量的磨细生石灰、石灰膏、石膏、粉煤灰、黏土膏、电石膏等物质作为掺和料。为了保证砂浆的质量，经常将生石灰先熟化成石灰膏，然后用孔径不大于3mm×3mm的网过滤，且熟化时间不得少于7d；如用磨细生石灰粉制成，其熟化时间不得少于2d。沉淀池中储存的石灰膏，应采取防止干燥、冻结和污染的措施。严禁使用脱水硬化的石灰膏。制成的膏类物质稠度一般为(120±5)mm，如果现场施工时，当石灰膏稠度与试配时不一致时，见表5-1。

表5-1 石灰膏不同稠度时的换算系数

石灰膏稠度/mm	120	110	100	90	80	70	60	50	40	30
换算系数	1.00	0.99	0.97	0.95	0.93	0.92	0.90	0.88	0.87	0.86



消石灰粉不得直接使用于砂浆中。

3. 聚合物

在许多特殊的场合可采用聚合物作为砂浆的胶凝材料。由于聚合物为链型或体型高分子化合物且黏性好，在砂浆中可呈膜状大面积分布，因此可提高砂浆的黏结性、韧性和抗

冲击性，同时也有利于提高砂浆的抗渗、抗碳化等耐久性能。在建筑砂浆中添加聚合物黏结剂，从而使砂浆性能得到很大改善，常用的聚合物有聚乙酸乙烯酯、甲基纤维素醚、聚乙烯醇、聚酯树脂、环氧树脂等。但聚合物有可能会使砂浆抗压强度下降，需慎重选用。

4. 细骨料

配制砂浆的细骨料最常用的是天然砂。砂应符合混凝土用砂的技术性质要求。由于砂浆层较薄，砂的最大粒径应有所限制，理论上不应超过砂浆层厚度的 1/5～1/4，砂的粗细程度对砂浆的水泥用量、和易性、强度及收缩等影响很大。也可以采用细炉渣等作为细骨料，但应该选用燃烧完全、未燃煤粉和其他有害杂质含量较小的炉渣，否则将影响砂浆的质量。

5. 用水要求

拌制砂浆用水与混凝土拌和用水的要求相同。GB 50204—2002 中 7.2.6 条规定：拌制混凝土宜采用饮用水，当采用其他水源时，水质均满足符合《混凝土用水标准(附条文说明)》(JGJ 63—2006)的规定。

6. 外加剂

为改善新拌及硬化后砂浆的各种性能或赋予砂浆某些特殊性能，常在砂浆中掺入适量外加剂。例如为改善砂浆和易性，提高砂浆的抗裂性、抗冻性及保温性，可掺入微沫剂、减水剂等外加剂；为增强砂浆的防水性和抗渗性，可掺入防水剂等；为增强砂浆的保温隔热性能，除选用轻质细骨料外，还可掺入引气剂提高砂浆的孔隙率。

5.1.2 砌筑砂浆的技术性质

砌筑砂浆在砌体中的作用主要是将砖石按一定的砌筑方法黏结成整体，砂浆硬固后，各层砖可以通过砂浆均匀地传布压力，使砌体受力均匀，砂浆填满砌体的间隙，可防止透风，对房屋起保暖、隔热的作用。因此砌筑砂浆有一定的强度要求，新拌砂浆应具有良好的和易性。

1. 砂浆的强度与等级

砌筑砂浆的强度通常是指立方抗压强度值，即砂浆强度等级是以 70.7mm×70.7mm×70.7mm 的 6 个一组的立方体试块，按标准条件养护至 28d 的抗压强度平均值确定的。规定的标准养护温度为(20±2)℃；标准养护湿度为：水泥混合砂浆试件要求的相对湿度为 60%～80%，水泥砂浆试件要求的相对湿度为 90%以上。

根据《砌筑砂浆配合比设计规程》(JGJ/T 98—2010))的规定，水泥砂浆及预拌砌筑砂浆的强度等级可分为 M5、M7.5、M10、M15、M20、M30 等 6 个等级。水泥混合砂浆的强度等级可分为 M5、M7.5、M10、M15 等 4 个等级。

影响砂浆强度的因素有材料性质、配合比、施工质量等。砂浆的实际强度除了与水泥的强度和用量有关外，还与基底材料的吸水性有关，可据此分为不吸水基层材料和吸水基层材料等情况。由于砖、石、砌块等材料是靠砂浆黏结成一个坚固整体并传递荷载的，因此要求砂浆与基材之间应有一定的黏结强度。两者黏结得越牢，则整个砌体的整体性、强度、耐久性及抗震性等越好。一般砂浆抗压强度越高，则其与基材的黏结强度越高。此外，

砂浆的黏结强度与基层材料的表面状态、清洁程度、湿润状况以及施工养护等条件有很大关系，同时还与砂浆的胶凝材料种类有很大关系，加入聚合物可使砂浆的黏结性大为提高。

特别提示

实际上，从砌体整体受力来看，砂浆的黏结性较砂浆的抗压强度更为重要。但是，抗压强度相对来说易于测定，因此，结合国内施工的实际情况，将砂浆抗压强度作为必检项目和配合比设计的依据。

2. 砂浆的和易性

砂浆的和易性包括流动性和保水性两个方面。

1) 流动性

砂浆的流动性也称稠度，是指砂浆在自重或外力作用下流动的性质。砂浆的流动性用砂浆稠度仪测定，以沉入度(单位为mm)表示。沉入度大的砂浆，流动性好。砂浆的流动性应根据砂浆和砌体种类、施工方法和气候条件来选择。砌筑砂浆的稠度见表5-2。

表5-2 砌筑砂浆的稠度

砌体种类	砂浆稠度/mm
烧结普通砖砌体	70～90
轻骨料混凝土小型空心砌块砌体	60～90
烧结多空砖、空心砖砌体	60～80
烧结普通砖平拱式过梁 空斗墙、筒拱 普通混凝土小型空心砌块砌体 加气混凝土砌块砌体	50～70
石砌体	30～50

特别提示

一般而言，抹面砂浆、多孔吸水的砌体材料、干燥气候和手工操作的砂浆，流动性应大些；而砌筑砂浆、密实的砌体材料、寒冷气候和机械施工的砂浆，流动性应小些。

2) 保水性

砂浆的保水性是指砂浆保持水分的能力。它反映新拌砂浆在停放、运输和使用过程中，各组成材料是否容易分离的性能。保水性良好的砂浆水分不易流失，容易摊铺成均匀的砂浆层，且与基底的黏结好、强度较高。

砂浆的保水性与胶结材料的类型和用量、砂的级配、用水量以及有无掺和料和外加剂等因素有关。砂浆的保水性用分层度测定仪测定，以分层度表示。砂浆的分层度以10～20mm为宜，分层度过大(超过30mm)，保水性差，容易离析，不便于施工和保证质量；分层度过小(低于10mm)，虽然保水性好，但易产生收缩开裂，影响质量。



硬化后的砂浆在承受荷载、温度变化或湿度变化时均会产生变形，如果变形过大或不均匀，都会引起沉陷或裂缝，降低砌体质量。掺太多轻骨料或掺加料配制的砂浆，其收缩变形比普通砂浆大。

3. 砌筑砂浆配合比设计

砌筑砂浆是将砖、石、砌块等黏结成为砌体的砂浆。砌筑砂浆主要起黏结、传递应力的作用，是砌体的重要组成部分。

砌体砂浆可根据工程类别及砌体部位的设计要求，确定砂浆的强度等级，然后选定其配合比。一般情况下可以查阅有关手册和资料来选择配合比，但如果工程量较大、砌体部位较为重要或掺入外加剂等非常规材料时，为保证质量和降低造价，应进行配合比设计。经过计算、试配、调整，从而确定施工用的配合比。

目前常用的砌筑砂浆有水泥砂浆和水泥混合砂浆两大类。根据《砌筑砂浆配合比设计规程》(JGJ/T 98—2010)规定：用于砌筑吸水底面的砂浆配合比设计或选用步骤如下。

1) 水泥混合砂浆配合比设计过程

(1) 确定试配强度；砂浆的试配强度可按下式确定：

$$f_{m,0} = kf_2 \tag{5-1}$$

式中 $f_{m,0}$——砂浆的试配强度(MPa)，应精确至0.1MPa；

f_2——砂浆强度等级值(MPa)，应精确至0.1MPa；

k——系数，按表5-3取值。

表5-3 砂浆强度标准差σ及k值

施工水平	强度标准差σ/MPa							K
	M5	M7.5	M10	M15	M20	M25	M30	
优良	1.00	1.50	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	1.15
一般	1.25	1.88	2.50	3.75	5.00	6.25	7.50	1.20
较差	1.50	2.25	3.00	4.50	6.00	7.50	9.00	1.25

(2) 砌筑砂浆现场强度标准差可按下式确定。

当有统计资料时，应按下式计算：

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} f_{m,i}^2 - n\mu_{fm}^2}{n-1}} \tag{5-2}$$

式中 $f_{m,i}$——统计周期内同一品种砂浆第i组试件的强度(MPa)；

μ_{fm}——统计周期内同一品种砂浆N组试件强度的平均值(MPa)；

n——统计周期内同一品种砂浆试件的组数，$N \geqslant 25$。

当不具有近期统计资料时，砂浆现场强度标准差σ，按表5-3取用。

(3) 每立方米砂浆中水泥用量可按下式确定。

$$Q_C = \frac{1000(f_{m,0} - B)}{A \cdot f_{ce}} \tag{5-3}$$

式中　Q_C——每立方米砂浆中的水泥用量，精确至1MPa；

$f_{m,0}$——砂浆的试配强度，精确至0.1MPa；

f_{ce}——水泥的实测强度，精确至0.1MPa；

A、B——砂浆的特征系数，其中 A=3.03，B= −15.09。

在无法取得水泥的实测强度 f_{ce} 时，可按下式计算：

$$f_{ce}=\gamma_c\cdot f_{cu,t} \tag{5-4}$$

式中　$f_{cu,t}$——水泥强度等级对应的强度值(MPa)；

γ_c——水泥强度等级值的富余系数，该值应按实际统计资料确定，无统计资料时取 γ_c=1.0。

当计算出水泥砂浆中的水泥用量不足200kg/m^{3}时，应按200kg/m^{3}采用。

(4) 水泥混合砂浆的掺和料用量应按下式计算。

$$Q_D=Q_A-Q_C \tag{5-5}$$

式中　Q_D——每立方米砂浆中掺加料用量，精确至1kg；石灰膏、黏土膏使用时的稠度为120±5mm；

Q_C——每立方米砂浆中水泥用量，精确至1kg；

Q_A——每立方米砂浆中水泥和掺加料的总量，精确至1kg；可为350kg/m^3。

(5) 确定砂子用量。每立方米砂浆中沙子用量 Q_S (kg/m^3)，应以干燥状态(含水率小于0.5%)的堆积密度作为计算值，即1m^{3}的砂浆含有1m^{3}堆积体积的砂。

(6) 确定用水量。每立方米砂浆中用水量 Q_W (kg/m^3)，可根据砂浆稠度要求选用210～310kg/m^3。

特别提示

混合砂浆中的用水量，不包括石灰膏或黏土膏中的水；当采用细砂或粗砂时，用水量分别取上限或下限；稠度小于70mm时，用水量可小于下限；施工现场气候炎热或干燥季节时，可酌量增加水量。

2) 水泥砂浆配合比选用

水泥砂浆材料用量见表5-4。

表5-4　水泥砂浆材料用量

单位：kg/m^3

强度等级	水泥用量	砂子用量	水用量
M5	200～230	1m^{3}干燥状态下砂的堆积密度值	270～330
M7.5	230～260		
M10	260～290		
M15	290～330		
M20	340～400		
M25	360～410		
M30	430～480		



表 5-4 中水泥强度等级为 32.5 级，大于 32.5 级水泥用量宜取下限；根据施工水平合理选择水泥用量。

3) 配合比的试配、调整与确定

砂浆试配时应采用工程中实际使用的材料，搅拌采用机械搅拌，搅拌时间自投料结束后算起，水泥砂浆和水泥混合砂浆不得小于 120s，掺用粉煤灰和外加剂的砂浆不得小于 180s。按计算或查表选用的配合比进行试拌，测定其拌和物的稠度和分层度，若不能满足要求，则应调整用水量和掺和料用量，直至符合要求为止。此时的配合比为砂浆基准配合比。

为了使测定的砂浆强度能在设计要求范围内，试配时至少采用 3 个不同的配合比，其中一个为基准配合比，另外两个配合比的水泥用量按基准配合比分别增加及减少 10%，在保证稠度和分层度合格的条件下，可将用水量或掺和料用量做相应调整。按《建筑砂浆基本性能试验方法标准》(JGJ/T 70—2009)的规定成型试件测定砂浆强度。在实验室制备砂浆拌和物时，所用材料应提前 24h 运入室内；拌和时实验室的温度应保持在(20±5)℃；试验所用原材料应与现场使用材料一致，原料砂应通过公称粒径 5mm 筛；实验室拌制砂浆时，材料用量应以质量计；称量精度：水泥、外加剂、掺合料等为±0.5%，砂为±1%；在实验室搅拌砂浆时应采用机械搅拌，搅拌机应符合《试验用砂浆搅拌机》(JG/T 3033—1996)的规定，搅拌的用量宜为搅拌机容量的 30%～70%，搅拌时间不应少于 120s；掺有掺合料和外加剂的砂浆，其搅拌时间不应少于 180s。

选定符合试配强度要求并且水泥用量最少的配合比作为砂浆配合比。砂浆配合比以各种材料用量的比例形式表示，水泥∶掺和料∶砂∶水=Q_C∶Q_D∶Q_S∶Q_W。

4) 砂浆配合比计算实例

设计实例：要求设计用于砌筑砖墙的 M7.5 等级，稠度 70～100mm 的水泥石灰砂浆配合比。设计资料如下：32.5MPa 普通硅酸盐水泥；石灰膏稠度 120mm；中砂，堆积密度为 1 450kg/m^3，含水率为 2%；施工管理水平一般。设计步骤如下。

(1) 计算试配强度　　$f_{m,0}=k_{f_2}$。

$$f_{m,0}=kf_2=1.2\times7.5=9(\text{MPa})$$

(2) 计算水泥用量Q_C。

$$Q_C=\frac{1\,000(f_{m,0}-B)}{A\times f_{ce}}=\frac{1\,000\times(9+15.09)}{3.03\times32.5}=245\ (\text{kg/m}^3)$$

式中 A=3.03，B=−15.09。

$$f_{ce}=\gamma_c\cdot f_{cu,t}=1.0\times32.5=32.5(\text{MPa})$$

(3) 计算石灰膏用量Q_D。

$$Q_D=Q_A-Q_C=350-245=105\ (\text{kg/m}^3)$$

式中 Q_A=350kg/m^3(按水泥和掺和料总量规定选取)。

(4) 根据砂子堆积密度和含水率，计算砂用量Q_S。

$$Q_S=1\,450\times(1+2\%)=1\,479(\text{kg/m}^3)$$

(5) 选择用水量 Q_W 。

$$Q_W = 300(\mathrm{kg/m^3})$$

(6) 砂浆试配时各材料的用量比例。

水泥：石灰膏：砂：水=245：105：1479：300

或水泥：石灰膏：砂：水=1：0.42：6.04：1.22

特别提示

需要模拟施工条件下所用的砂浆时，所用原材料的温度宜与施工现场保持一致。

5.2 干混砂浆

5.2.1 概念

干混砂浆又称干粉料、干混料或干粉砂浆。它是由胶凝材料、细骨料、外加剂(或掺和料)等固体材料组成，经专业化厂家生产的砂浆半成品，不含拌和水。拌和水使用前在施工现场搅拌时加入，是用于建设工程中的各种砂浆拌和物，因此也称预拌砂浆。

干混砂浆按性能可分为普通干混砂浆和特种干混砂浆。普通干混砂浆又分为砌筑工程用干混砌筑砂浆(DM——干拌砌筑砂浆)和抹灰工程用干混砂浆(DPI——干拌内墙抹灰砂浆；DPE——干拌外墙抹灰砂浆；DS——干拌地面砂浆)。特种干拌砂浆又可分为：DTA——干拌瓷砖黏结砂浆；DEA——干拌聚苯板黏结砂浆；DBI——干拌外保温抹面砂浆。

5.2.2 普通干混砂浆

普通干混砂浆的特点表现为以下几方面。

1) 黏结能力和保水性好

干混砌筑砂浆具有优异的黏结能力和保水性，使砂浆在施工中凝结得更为密实，在干燥砌块基面都能保证砂浆的有效凝结。

2) 干缩率低

干缩砂浆具有干缩率低的特性，能够最大限度地保证墙体尺寸的稳定性；胶凝后具有刚中带韧的特性，能提高建筑物的安全性能。

3) 强度高、抗渗性能好

抹灰工程用的干混抹灰砂浆能承受一系列外部作用；有足够的抗水冲击能力；可用在浴室和其他潮湿的房间抹灰工程中；减少抹灰层数，提高工效。

4) 和易性好

干混抹灰砂浆具有良好的和易性，使施工好的基面光滑平整、均匀；具有良好的抗流挂性能，对抹灰工具有低黏性、易施工性；具有更好的抗裂、抗渗性能。

5.2.3 特种干混砂浆

特种干混砂浆是指对性能有特殊要求的专用建筑、装饰类干混砂浆，如瓷砖黏结砂浆、聚苯板(EPS)黏结砂浆、外保温抹面砂浆等。

1. 瓷砖黏结砂浆

瓷砖黏结砂浆可节约材料用量，可实现薄层黏结，黏结力强，减少分层和剥落，避免空鼓、开裂；操作简单方便，使施工质量和效率得到大幅提高。

2. 聚苯板(EPS)黏结砂浆

聚苯板(EPS)黏结砂浆对基底和聚苯乙烯板有良好的黏结力；有足够的变形能力(柔性)和良好的抗冲击性；自重轻，对墙体要求低，能直接在混凝土和砖墙上使用；环保无毒，节约大量能源；有极佳的凝结力和表面强度；低收缩、不开裂、不起壳、长期的耐候性与稳定性；加水即用，避免了现场搅拌砂浆的随意性；质量稳定，有良好的施工性能；耐碱、耐水、抗冻融、快干、早强、施工效率高。

3. 外保温抹面砂浆

外保温抹面砂浆是指聚苯乙烯颗粒添加纤维素、胶粉、纤维等添加剂的，具有保温隔热性能的砂浆产品。加水即用，施工方便。其物理力学性能稳定，收缩率低，不易出现收缩开裂或龟裂，可在潮湿基面上施工，干燥硬化快，施工周期短；环保，隔热效果好，密度小，自重轻，有利于结构设计。

知识链接

干混砂浆是从20世纪50年代的欧洲建筑市场发展壮大起来的，如今德国、奥地利、芬兰等国家已将干混砂浆作为主要的砂浆材料，在亚洲的新加坡、日本、韩国、中国香港等地，干混砂浆发展也十分迅速。我国自90年代开始推广干混砂浆至今，相应的指导政策与规范已逐步实施。2007年6月商务部、原建设部等部委联合发布了《关于在部分城市限期禁止现场搅拌砂浆工作的通知》，明确规定分3批自2009年7月1日起禁止在施工现场使用水泥搅拌砂浆，有力促进了散装水泥和干混砂浆的推广。目前，中国的干混砂浆发展很不平衡，经济发展较快的长江三角洲、珠江三角洲和环渤海地区是干混砂浆发展最快的3个地区，80%以上的干混砂浆企业都集中在此。上海市是我国开展建筑砂浆科研工作最早的城市之一，也是目前发展干混砂浆最快的地区，2008年全市干混砂浆生产企业已达100余家。

5.2.4 传统砂浆与干混砂浆的比较

1. 传统砂浆的缺点和局限性

1) 很难满足文明施工和环保要求

首先，各种原材料(包括水泥、砂子、石灰膏等)的存放会对周围的环境造成影响。其次在砂浆拌制过程中会形成较多的扬尘；再者，现场拌和砂浆的搅拌设备往往噪声超标。

2) 难以保证施工质量

首先，因现场拌和计量的不准确而造成砂浆质量的异常波动，无法准确添加微量的外加剂，不能准确控制加水量，搅拌的均匀度难以控制。其次，现场拌和砂浆施工性能差，因现拌砂浆无法或很少添加外加剂，和易性差，难以进行机械施工，操作费时费力，落灰多，浪费大，质量事故多。再次，现拌砂浆品种单一，无法满足各种新型建材对砂浆的不同要求。

2. 干混砂浆的优势

1) 生产质量有保证

干混砂浆由专业厂家生产，有固定的场所、成套的设备、精确的计量、完善的质量控制体系。

2) 施工性能与质量优越

干混砂浆根据产品种类及性能要求，特定设计配合比并添加多种外加剂进行改性，如常用的外加剂有纤维素醚、可再分散乳胶粉、触变润滑剂、消泡剂、引气剂、促凝剂、憎水剂等。改性的砂浆具有优异的施工性能和品质，良好的和易性；方便砌筑、抹灰和泵送，可提高施工效率。

3) 产品种类齐全、满足各种不同工程要求

据不完全统计，干粉砂浆已有保温、抗渗、灌浆、修补、装饰类等多个品种。

4) 高质环保、具有明显的社会效益

干混砂浆现场施工扬尘少、施工速度快、工人劳动强度低，整体社会效益明显。

知识链接

在西方国家，干混砂浆从20世纪50年代初发展到现在，已有50多个品种，干混砂浆的研究也很广泛。在中国，约有20个品种的干混砂浆制定了相应的行业标准。随着干混砂浆的应用范围逐渐扩展，研究领域逐步扩大。品种也逐渐增多包括：砌筑砂浆、瓷砖黏结剂、勾缝剂、腻子、自流平砂浆、混凝土修补砂浆、干混保温砂浆、外保温系统专用砂浆、装饰砂浆等。干混砂浆的用途不同，其性能技术指标要求也各不相同，不同种类干混砂浆的主要力学性能及导热系数也有不同要求。

5.3 特种砂浆

1. 隔热砂浆

采用水泥等胶凝材料以及膨胀珍珠岩、膨胀蛭石、陶粒砂等轻质多孔骨料，按照一定比例配制的砂浆。具有质量轻、保温隔热性能好，导热系数一般为0.07～01.0W/(m・K)等特点，主要用于屋面、墙体绝热层和热水、空调管道的绝热层。常用的隔热砂浆有：水泥膨胀珍珠岩砂浆、水泥膨胀蛭石砂浆、水泥石灰膨胀蛭石砂浆等。

2. 吸声砂浆

一般采用轻质多孔骨料拌制而成的吸声砂浆，由于其骨料内部孔隙率大，因此吸声性能也十分优良。吸声砂浆还可以在砂浆中掺入锯末、玻璃纤维、矿物棉等材料拌制而成。吸声砂浆主要用于室内吸声墙面和顶面。

3. 耐腐蚀砂浆

1) 水玻璃类耐酸砂浆

一般采用水玻璃作为胶凝材料拌制而成，常常掺入氟硅酸钠作为促硬剂。耐酸砂浆主要作为衬砌材料、耐酸地面或内壁防护层等。

2) 耐碱砂浆

使用42.5级以上的普通硅酸盐水泥(水泥熟料中铝酸三钙含量应小于9%)，细骨料可采用耐碱、密实的石灰岩类(石灰岩、白云岩、大理岩等)、火成岩类(辉绿岩、花岗岩等)制成的砂和粉料，也可采用石英质的普通砂。耐碱砂浆可耐一定温度和浓度下的氢氧化钠和铝酸钠溶液的腐蚀以及任何浓度的氨水、碳酸钠、碱性气体和粉尘等的腐蚀。

3) 硫黄砂浆

以硫黄为胶结料，加入填料、增韧剂，经加热熬制而成的砂浆。采用石英粉、辉绿岩粉、安山岩粉作为耐酸粉料和细骨料。硫黄砂浆具有良好的耐腐蚀性能，几乎能耐大部分有机酸、无机酸、中性和酸性盐的腐蚀，对乳酸也有很强的耐蚀能力。

4．防辐射砂浆

采用重水泥(钡水泥、锶水泥)或重质骨料(黄铁矿、重晶石、硼砂等)拌制而成，可防止各类辐射的砂浆，主要用于射线防护工程。

5. 聚合物砂浆

聚合物砂浆是在水泥砂浆中加入有机聚合物乳液配制而成的，具有黏结力强、干缩率小、脆性低、耐蚀性好等特性，用于修补和防护工程。常用的聚合物乳液有氯丁胶乳液、丁苯橡胶乳液、丙烯酸树脂乳液等。

5.4 抹面砂浆

凡涂抹在基底材料的表面，兼有保护基层和增加美观作用的砂浆，可统称为抹面砂浆。根据抹面砂浆功能的不同，一般可将抹面砂浆分为普通抹面砂浆、防水砂浆、装饰砂浆和特种砂浆(如绝热、吸声、耐酸、防射线砂浆)等。

5.4.1 抹面砂浆技术要求

与砌筑砂浆相比，抹面砂浆的特点和技术要求如下。

(1) 抹面层不承受荷载。

(2) 抹面砂浆应具有良好的和易性，容易抹成均匀平整的薄层，便于施工。

(3) 抹面层与基底层要有足够的黏结强度，使其在施工中或长期自重和环境作用下不脱落、不开裂。

(4) 抹面层多为薄层，并分层涂抹，面层要求平整、光洁、细致、美观。

(5) 多用于干燥环境，大面积暴露在空气中。

抹面砂浆的组成材料与砌筑砂浆基本上是相同的。但为了防止砂浆层的收缩开裂，有时需要加入一些纤维材料，或者为了使其具有某些特殊功能需要选用特殊骨料或掺和料。与砌筑砂浆不同，抹面砂浆的主要技术性质指标不是抗压强度，而是和易性以及与基底材料的黏结强度。



5.4.2 普通抹面砂浆

普通抹面砂浆对建筑物和墙体能起到保护作用。它可以抵抗风、雨、雪等自然环境对建筑物的侵蚀，并提高建筑物的耐久性，同时经过抹面的建筑物表面或墙面又可以达到平整、光洁、美观的效果。

常用的普通抹面砂浆有水泥砂浆、石灰砂浆、水泥混合砂浆、麻刀石灰砂浆(简称麻刀灰)、纸筋石灰砂浆(简称纸筋灰)等。

普通抹面砂浆通常分为两层或三层进行施工。底层抹灰的作用是使砂浆与基底能牢固地黏结，因此要求底层砂浆具有良好的和易性、保水性和较好的黏结强度；中层抹灰主要是找平，有时可省略；上层抹灰是为了获得平整、光洁的表面效果。

各层抹灰面的作用和要求不同，因此每层所选用的砂浆也不一样。同时不同的基底材料和工程部位，对砂浆技术性能要求也不同，这也是选择砂浆种类的主要依据。

特别提示

水泥砂浆宜用于潮湿或强度要求较高的部位；混合砂浆多用于室内底层或中层或面层抹灰；石灰砂浆、麻刀灰、纸筋灰多用于室内中层或面层抹灰。水泥砂浆不得涂抹在石灰砂浆层上。普通抹面砂浆的组成材料及配合比，可根据使用部位及基底材料的特性确定，一般情况下参考有关资料和手册选用。

本任务小结

建筑砂浆是由砂、水泥、掺和料、水及外加剂组成，是建筑工程不可缺少的重要材料之一，主要起胶结、衬垫和传递荷载作用。

建筑砂浆按功能和用途不同，分为砌筑砂浆、抹面砂浆和特种砂浆；按所用胶凝

材料不同分为水泥砂浆、石灰砂浆和混合砂浆。新拌砂浆要求具有良好的和易性。砂浆的和易性包括流动性和保水性两方面的含义。砂浆的强度一般指立方体抗压强度。根据砂浆的抗压强度将砂浆划分为6个强度等级。当基层为吸水材料时，砂浆的强度主要取决于水泥强度等级和水泥用量。

砌筑砂浆应进行砂浆配合比设计来保证砂浆的强度，从而保证工程质量。

干混砂浆是砂浆发展的方向，特点突出，有非常广阔的应用前景。

特种砂浆应用范围广泛，注意掌握其原材料特点。

抹面砂浆要求具有良好的和易性，容易抹成均匀平整的薄层；与基层有足够的黏结力，长期使用不开裂和脱落。装饰砂浆是指涂抹在建筑物表面，主要起装饰作用的砂浆。



一、简答题

1．配制砂浆时，为什么除水泥外常常还要加入一定量的其他胶凝材料？

2．为什么在一般砌筑工程中水泥混合砂浆用量最大？

3．砂浆的和易性包括哪些含义？各用什么来表示？

4．抹面砂浆的技术要求与砌筑砂浆的要求有何异同？

二、案例题

1．工地夏秋季要配制 M5.0 水泥石灰混合砂浆砌筑砖墙，采用中砂，含水率 2%，32.5 级的普通水泥，堆积密度 1 400kg/m^3，试计算该砂浆的配合比(施工水平一般)。

2．干混砂浆有哪些特点？结合工程实践找一找影响干混砂浆推广的主要原因。



学习任务6

墙 体 材 料

学习目标

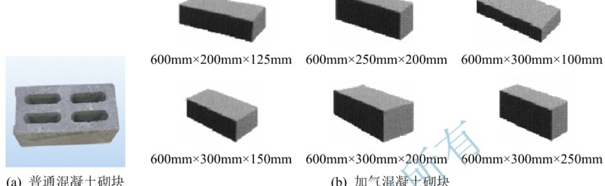
掌握砌墙砖、墙用砌块和典型墙用板材的主要特点和应用，了解墙体材料的发展趋势和产业政策。

学习要求

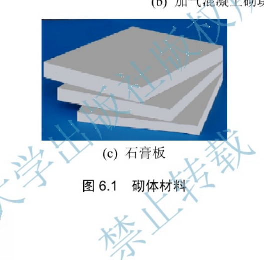
能力目标	知识要点	权重
用简易的方法鉴别过火砖和欠火砖	烧结普通砖的技术要求及质量检测	20%
能看懂烧结普通砖、烧结多孔砖和烧结空心砖的标识	烧结多孔砖、烧结空心砖的技术要求及质量检测	40%
能对烧结多孔砖进行尺寸偏差及外观质量检测；能判定砖的密度等级；会进行砖的抗压强度试验，并能通过试验数据判定砖的强度等级	非烧结砖(灰砂砖、粉煤灰砖和炉渣砖)的性能特点和应用	20%
	加气混凝土砌块、普通混凝土空心砌块、烧结多孔砌块、粉煤灰砌块和石膏砌块的性能特点及应用	10%
	墙用板材的种类	5%
	典型墙用板材的性能特点及应用	5%

任务导读

砌体结构所用材料主要是砖、石或砌块以及砌筑砂浆。砌成墙体，起承重、围护和分隔作用，合理选择墙体材料，对建筑功能、安全以及造价等均具有重要意义(图 6.1)。



(a) 普通混凝土砌块　　(b) 加气混凝土砌块



(c) 石膏板

图 6.1　砌体材料

知识点滴

砌墙砖在中国的变迁

砌墙砖在我们的生活中无处不在。无论是雄伟的万里长城、金碧辉煌的紫禁城，还是现代化的高楼大厦，砖始终都是它们主要的建筑材料之一。

在中国，砖大约起源于春秋战国时期。现代的考古发现在春秋战国时期的建筑遗址中可以找到各种各样的砖块，比如方砖、条形砖以及栏杆砖等。当时砖主要用于建造房子，不过在那种年代砖还是一种奢侈品，只有达官贵族才住得起砖建造的房子。另外春秋战国时期砖还被艺术家们当作是雕刻的材料，考古学家已经从春秋战国时期的遗址中出土了大量刻有文字、飞禽走兽等图形的砖。

在古代，大概有两种制砖方法：第一是烧制，制砖工人用模板做出砖块模型，然后放在砖窑里烧，这类砖的质量和硬度比较高，只有地主和官家才用得起；第二是晾晒，工人把做好的砖不用经过烧制直接通过晾晒成型，这类砖我们称为是“泥砖”，是普通家庭建造房子最主要的材料。秦始皇统一六国后为彰显自己的丰功伟绩，大兴土木，建阿房宫、筑长城、兴都城、修驰道、筑陵墓等，这些建筑的兴建极大地刺激了对砖的需求，也无意中推动了制砖业和制砖技术的发展。

砖在中国古代的建筑发展过程中缔造了无数令世人惊叹的代表作品，如万里长城、北京故宫、秦始皇陵、佛教砖塔等。值得一提的是明朝出现的一种“金砖”，明成祖朱棣在建筑故宫时想要一种比石头和金属更坚实的材料，他想到了“砖”。于是，他命令用山东德州出产的黏土制砖并使用高温窑柴火连续烧130d，并且在出窑后再用桐油浸透49d。桐油容易浸透，一磨就会出光。砖铺在地面不断被磨透，500年以后的今天依然完好如初。故宫所用方砖质地坚硬，敲打时有金之声，故称“金砖”。“金砖”的出现表明了我国制砖业水平达到了一个全新的高度。

工业革命的兴起宣布世界进入机械时代，制砖业也从手工发展到机械动力时代。城市的发展促进了砖的需求量大增，制砖行业出现了一派繁荣的景象，各种制砖机械被发明，砖的种类丰富多样，砖的质量不断提高。工业革命虽然刺激了制砖业的繁荣，但是传统制砖业的烧制方法给城市和环境带来了严重的破坏，大量的灰尘弥漫天空，砖厂周围的人看不到远方，人们的生活受到严重干扰，人们开始抗议。就在制砖行业受到社会普遍指责的时候，免烧砖机出现了。免烧砖机生产的砖不用经过烧烤的工序，只是需要经过一小段时间的晾晒就可以出厂，而且砖的质量更加好，制砖的原料也可以是多种多样的。制砖业由于免烧砖机的出现，又得到了社会的认可，并且由环境污染产业变成了环保产业。随着时代的前进免烧砖机必将会取代传统制砖机成为制砖行业的主流制砖设备。



引 例

墙体材料的用量几乎占整个房屋建筑总重量的50%左右。长期以来，房屋建筑的墙体砌筑一直是沿袭使用普通烧结砖，既破坏了良田又耗用了大量能源。发展混凝土空心砌块不仅是取代普通烧结砖，更重要的是保护环境，节约资源、能源，满足建筑结构体系的发展(包括抗震以及多功能的需要)。当前，新型墙体材料正朝着大型化、轻质化、节能化、利废化、复合化、装饰化及集约化等方面发展。

但是普通混凝土小型空心砌块墙极易产生裂缝，施工时必须严格按操作规程操作，才能减少或延缓裂缝产生。

(1) 选择技术管理严格、上规模、质量可靠的企业产品。产品养护期，春、夏、秋季必须在一个月以上，冬季还应延长。目的是除了产品强度必须达到要求外，砌块的收缩在厂里可以完成大半，减少上墙后的收缩。200mm厚的墙应用双排孔砌块，240mm厚的墙应用三排孔砌块。

(2) 干燥砌块送到现场后，尽量放在室内，产品不能受潮。如不能放在室内，露天堆放场地的四周要开排水沟，雨天要遮盖。受潮砌块不能上墙，雨天不要施工，并要遮盖好砌体。

(3) 砌筑前不必预先湿润砌块，这是与黏土砖的不同之处，否则砌筑时会发生“游砖”，加大砌块的干缩(夏天允许少量洒水)。

(4) 混凝土小型空心砌块承重墙砌筑前应预先进行排块，严禁出现通缝。填充墙可用实心砖配砖。

(5) 砌墙时，一层不能一天砌到顶，一天砌筑高度不要超过1.5m。墙顶斜砖尽量迟塞，最低不少于一星期。斜砖角度以55°为宜，斜砖必须塞紧，可选择水泥斜砖，砌筑砂浆必须饱满。

(6) 框架柱边每三皮砌块要设拉结筋，拉结筋上下应用实心砖镶砌，以防钢筋在孔洞里锈蚀。

(7) 砌筑时，除水平灰缝必须饱满外，头缝饱满也十分重要，应将砌块竖起，满铺砂浆后再横过来，与前面砌块用橡皮榔头撞紧。松动的砌块必须铲除砂浆重砌，边砌边勾缝。

(8) 砌块墙体粉刷时间应尽量延后。粉刷时，墙体不可浇水，应刷界面剂后再粉刷。梁底柱边应用丝径不小于0.5mm、孔径不大于10mm的编织或焊接钢丝网加强防裂。加强网应有可靠的固定措施，加强网不能起拱、滑动。市面上供应的劣质玻纤网(20～30mm宽)不能用。粉刷层表面宜用高弹性泥子，以减少裂缝。

(9) 墙体严禁手工开凿线槽。不得在砌块墙上水平开槽，竖槽应用切割机先开缝，再轻凿开槽。管道较集中的大开口处应用细石混凝土填实，再外覆钢丝网粉刷。

6.1 砌 墙 砖



引 例

安置房汇景嘉园砖脆脆，市政府责令问题楼全部重建

位于某市的“汇景嘉园”小区二期工程，共有8栋六层楼房。主体工程于2011年3月动工，到5月底8栋楼房全部封顶。然而从2011年6月初开始，就出现了质量问题。

2011年6月11日，主体刚封顶的楼房表面，砖体出现大面积的爆裂和粉化现象，砌体所用的砖表面严重风化、起皮，用手一摸大面积脱落，施工现场未使用的砖轻轻一掰就断成两截，被业主和媒体称为“砖脆脆”。6月14日，该市建委成立“汇景嘉园”小区煤矸石烧结多孔砖质量问题调查组。调查组成立当天，市建委就责令汇景嘉园全面停工，要求建设单位委托某建筑工程质量检验测公司对工程进场材料、砌体抗压强度、砌体砂浆强度、混凝土构件钢筋配置和保护层厚度进行检测，对主体结构安全性做出鉴定。7月12日，检测报告出炉，报告显示，多数墙体爆裂面积占载体面积的90%以上，最高的达98%，严重影响墙体整体承载能力。主要原因是使用了不合格的煤矸石烧结砖引起，并严重影响工程的主体结构安全。7月17日，“汇景嘉园”安置房小区8栋已封顶的楼房开始拆除。

砌墙砖按规格、孔洞率及孔的大小，分为普通砖、多孔砖和空心砖；按工艺不同又分为烧结砖和非烧结砖。

6.1.1 烧结普通砖

烧结普通砖是以黏土、页岩、煤矸石、粉煤灰为主要原料经焙烧而成的普通砖，是无孔洞或孔洞率小于15%的实心砖。

焙烧窑中为氧化气氛时，可烧的红砖；若焙烧窑中为还原气氛，则所烧得的砖呈现青色，青砖较红砖耐碱，耐久性较好。

砖在焙烧时窑内温度存在差异，因此，除了正火砖(合格品)外，还常出现欠火砖和过火砖。欠火砖色浅，敲击声发哑，吸水率大、强度低、耐久性差。过火砖色深、敲击声清脆、吸水率低、强度较高，但易弯曲变形。欠火砖和过火砖均属于不合格产品。

特别提示

烧结砖的基本生产工艺流程为：采土→原料调制→制坯成型→干燥→焙烧→制品。

1．烧结普通砖的技术指标

1) 尺寸规格

《烧结普通砖》(GB 5101—2003)规定：烧结普通砖的标准尺寸是240mm×115mm×53mm，如图6.2所示。通常将240mm× 115mm面称为大面，240mm×53mm面称为条面，115mm×53mm面称为顶面。4块砖长、8块砖宽、16块砖厚，再加上砌筑灰缝(10mm)，长度均为1m，则$1m^3$砖砌体理论上需用砖512块。

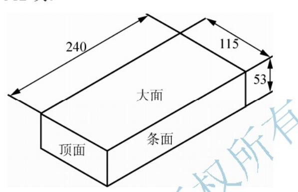


图6.2　烧结普通砖的尺寸及平面名称

2) 强度等级

烧结普通砖按抗压强度分为MU30、MU25、MU20、MU15、MU10五个等级。在评定强度等级时，若强度变异系数$\delta \leqslant 0.21$时，采用平均值-标准值方法；若强度变异系数$\delta > 0.21$时，则采用平均值-最小值方法。烧结普通砖的强度等级见表6-1。

$$\delta = \frac{s}{\bar{f}} \tag{6-1}$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{9}\sum_{i=1}^{10}\left(f_i - \bar{f}\right)^2} \tag{6-2}$$

$$f_k = \bar{f} - 1.8s \tag{6-3}$$

式中　δ——砖强度变异系数，精确至0.01；

s——标准差，精确至0.01MPa；

f_i——单块试样的抗压强度测定值，精确至0.01MPa；

$\bar{f}$——10块试样的抗压强度平均值，精确至0.01MPa；

f_k——强度标准值，精确至0.1MPa。

表6-1　烧结普通砖的强度等级

单位：MPa

强度等级	抗压强度平均值 $\bar{f} \geqslant$	变异系数 $\delta \leqslant 0.21$	变异系数 $\delta > 0.21$
		强度标准值 $f_k \geqslant$	单块最小抗压强度值 $f_{min} \geqslant$
MU30	30.0	22.0	25.0
MU25	25.0	18.0	22.0
MU20	20.0	14.0	16.0
MU15	15.0	10.0	12.0
MU10	10.0	6.5	7.5

3) 产品等级

强度、抗风化性能和放射性物质合格的砖，根据尺寸偏差、外观质量、泛霜和石灰爆裂等指标，分为优等品(A)、一等品(B)、合格品(C)这 3 个等级。烧结普通砖的质量等级见表 6-2。

表 6-2　烧结普通砖的质量等级

项　　目	优等品		一等品		合格品	
	样本平均偏差	样本极差≤	样本平均偏差	样本极差≤	样本平均偏差	样本极差≤
(1) 尺寸偏差/mm						
公称尺寸 240	±2.0	6	±2.5	7	±3.0	8
115	±1.5	5	±2.0	6	±2.5	7
53	±1.5	4	±1.6	5	±2.0	6
(2) 外观质量						
两条面高度差≤	2		3		4	
弯曲≤	2		3		4	
杂质凸出高度≤	2		3		4	
缺棱掉角的 3 个破坏尺寸，不得同时大于裂纹长度≤	5		20		30	
①大面上宽度方向及其延伸至条面的长度	30		60		80	
②大面上宽度方向及其延伸至顶面的长度或条顶面上水平裂纹的长度	50		80		100	
完整面不得少于	两条面和两顶面		一条面和一顶面		—	
颜色	基本一致		—		—	
(3) 泛霜	无泛霜		不允许出现中等泛霜		不允许出现严重泛霜	
(4) 石灰爆裂	不允许出现最大破坏尺寸大于 2mm 的爆裂区域		①最大破坏尺寸大于 2mm 且小于等于 10mm 的爆裂区域，每组砖样不得多于 15 处 ②不允许出现最大破坏尺寸大于 10mm 的爆裂区域		①最大破坏尺寸大于 2mm 且小于等于 15mm 的爆裂区域，每组砖样不得多于 15 处，其中大于 10mm 的不得多于 7 处 ②不允许出现最大破坏尺寸大于 15mm 的爆裂区域	

注：(1)为装饰而施加的色差、凹凸纹、拉毛、压花等不算缺陷。

(2)凡有下列缺陷之一者，不得称为完整面。

①缺损在条面或顶面上造成的破坏面尺寸同时大于 10mm×10mm。

②条面或顶面上裂纹宽度大于 1mm，其长度超过 30mm。

③压陷、黏底、焦花在条面或顶面上的凹陷或凸出超过 2mm，区域尺寸同时大于 10mm×10mm。

抗风化性能是指在干湿变化、温度变化、冻融变化等物理因素作用下，材料不被破坏并长期保持原有性质的能力。我国按风化指数分为严重风化区(风化指数≥12 700)和非严重

风化区(风化指数＜12 700)。风化区用风化指数进行划分。风化指数=日气温从正温降至负温或负温升至正温的每年平均天数×每年从霜冻之日起至消失霜冻之日止这一期间降雨总量(mm)的平均值。

泛霜(又称起霜、盐析、盐霜)是指黏土原料中的可溶性盐类(如硫酸盐等)在砖或砌块表面的析出现象，一般呈白色粉末、絮团或絮片状。

石灰爆裂是指烧结砖的砂质黏土原料中夹杂着石灰石，焙烧时被烧成生石灰块，在使用过程中吸水消化成熟石灰，体积膨胀，导致砖块裂缝，严重时甚至使砖砌体强度降低，直至破坏。烧结普通砖的质量缺陷，如图 6.3 所示。



(a) 泛霜的墙面



(b) 石灰爆裂导致砖碎裂

图 6.3 烧结普通砖的质量缺陷

4) 产品标记

按产品名称、品种、强度等级和标准编号的顺序编写。如烧结普通砖，强度等级 MU15，一等品的黏土砖，其标记为：烧结普通砖 N MU15 B GB 5101。

2. 烧结普通砖的应用

烧结普通砖是传统墙体材料，主要用于砌筑建筑物的内墙、外墙、柱、烟囱和窑炉。烧结普通砖价格低廉，具有一定的强度、隔热、隔声性能及较好的耐久性。它的缺点是制砖取土、大量毁坏农田、烧砖能耗高、砖自重大、成品尺寸小、施工效率低、抗震性能差等。

在应用时，必须认识到砖砌体的强度不仅取决于砖的强度，而且受砂浆性质的影响。砖的吸水率大，在砌筑中吸收砂浆中的水分，如果砂浆保持水分的能力差，砂浆就不能正常硬化，导致砌体强度下降。为此，在砌筑砂浆时除了要合理配制砂浆外，还要使砖润湿。黏土砖应在砌筑前 1～2d 浇水湿润，以浸入砖内深度 1cm 为宜。

当今，我国正大力推广墙体材料改革，以空心砖、工业废渣砖及砌块、轻质板材来代替实心黏土砖，减轻建筑物自重、节约能源、改善环境。

知识链接

持续推进“禁实”工作，大力发展新型墙材

截至 2009 年年底，全国已累计实现“禁实”的城市(区)已达 229 个，占“禁实”目标 170 个城市的 135%。“禁实”工作推动了新型墙体材料的迅速发展，促进了住宅建设现代化水平的提高。但持续推进“禁实”工作仍然有着重要的现实意义。

(1) 大力开展墙体材料革新是实现建筑节能工作的基本保障。为加快建设资源节约型、环境友好型社会，我国已把实现“十一五”期间万元GDP能耗在“十五”期末的基础上降低20%的节能目标作为约束性指标。建设部统计数据表明，目前我国建筑耗能约占社会总耗能的28%，而且这一比例未来将可能逐步上升至40%，建筑耗能将会超过工业、交通、农业等其他行业，居各行业能源消耗之首。据估计，我国现有建筑中95%达不到节能标准，新增建筑中节能不达标的超过八成，单位建筑面积能耗是发达国家的2~3倍，这些对社会造成了沉重的能源负担和严重的环境污染。而大力发展替代传统墙材的新型墙材是实现建筑节能工作的基本保障和重要基础性工作。

(2) 大力开展墙体材料革新是缓解耕地矛盾的需要。我国人均耕地仅1.39亩，不到世界平均水平的40%，土地资源极为宝贵。目前，我国房屋建筑材料中70%是墙体材料，其中黏土砖仍占据主导地位，而生产黏土墙体材料的黏土资源则又是相对较优质的黏土，烧砖毁坏了大量的耕地。大力发展新型墙体材料是保护耕地，实现可持续发展的重要条件。

(3) 大力发展墙体材料革新是改善建筑功能、加速住宅产业现代化的需要。推广新型墙材改变传统施工工艺，提高施工效率。目前推广的新型墙体材料中使用较多的有多排矩形多孔空心砖、加气混凝土砌块及板材、陶粒砼砌块及轻质复合保温板等，比实心黏土砖具有更高的热阻、更低的传热系数和更好的热惰性质，因而用这些材料建造的房屋比实心黏土砖建造的砖混建筑舒适度更高，等量建筑面积提供的使用面积更大，使用经济性更好。因此，发展墙体材料革新对改善建筑功能、全面提高人民的居住质量意义重大，也是加速住宅产业化的必然选择。

6.1.2 烧结多孔砖、空心砖

1. 烧结多孔砖

烧结多孔砖的孔洞率≥28%，孔的尺寸小而数量多。使用时孔洞垂直于受压面，主要用于建筑物承重部位。

《烧结多孔砖和多孔砌块》(GB 13544—2011)规定：砖为直角六面体，按主要原料砖分为黏土砖(N)、页岩砖(Y)、煤矸石砖(M)、粉煤灰砖(F)、淤泥砖(U)和固体废弃物砖(G)。

1) 技术规定

(1) 规格。烧结多孔砖的外形一般为直角六面体，在与砂浆的接合面上应设有增加结合力的粉刷槽(设在条面或顶面上深度不小于 2mm 的沟或类似结构)和砌筑砂浆槽(设在条面或顶面上深度大于15mm的凹槽)。规格尺寸为：290mm、240mm、190mm、180mm、140mm、115mm、90mm，如图6.4所示。

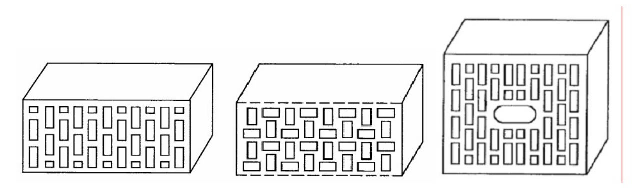


图 6.4 烧结多孔砖规格

(2) 强度等级。烧结多孔砖根据抗压强度分为 MU30、MU25、MU20、MU15、MU10 五个等级，用抗压强度平均值和强度标准值评定，强度等级见表 6-3。

$$s=\sqrt{\frac{1}{9}\sum_{i=1}^{10}\left(f_i-\overline{f}\right)^2} \tag{6-4}$$

$$f_k=\overline{f}-1.83s \tag{6-5}$$

式中　s——10 块试样的抗压强度标准差，精确至 0.01MPa；

f_i——单块试样的抗压强度测定值，精确至 0.01MPa；

$\overline{f}$——10 块试样的抗压强度平均值，精确至 0.01MPa；

f_k——强度标准值，精确至 0.1MPa。

表 6-3　烧结多孔砖的强度等级

单位：MPa

强度等级	抗压强度平均值 $\overline{f}\geqslant$	强度标准值 $f_k\geqslant$
MU30	30.0	22.0
MU25	25.0	18.0
MU20	20.0	14.0
MU15	15.0	10.0
MU10	10.0	6.5

(3) 密度等级。烧结多孔砖的密度等级分为 1 000、1 100、1 200、1 300 四个等级，见表 6-4。

表 6-4　烧结多孔砖的密度等级

单位：kg/m^3

密度等级	3 块砖干燥表观密度平均值	密度等级	3 块砖干燥表观密度平均值
1000	900～1 000	1 200	1 100～1 200
1100	1 000～1 100	1 300	1 200～1 300



多孔砖砌体砌筑时砂浆进入多孔砖孔洞，产生“销键”作用，比实心砖提高抗剪能力 10%以上，也提高了砌体整体性。

(4) 烧结多孔砖的外观质量见表 6-5。

表 6-5　烧结多孔砖的外观质量

项　　目	指　　标
完整面/不得少于	一条面和一顶面
缺棱掉角的 3 个破坏尺寸/不得同时大于	30

续表

项　　目		指　　标
裂纹长度/mm≤	大面(有孔面)上深入孔壁15mm以上宽度方向及其延伸到条面的长度	80
	大面(有孔面)上深入孔壁15mm以上宽度方向及其延伸到顶面的长度	100
	条顶面上的水平裂纹	100
杂质在砖面上造成的凸出高度/mm≤		5

注：凡有下列缺陷之一者，不得称为完整面。
①缺损在条面或顶面上造成的破坏面尺寸同时大于20mm×30mm。
②条面或顶面上裂纹宽度大于1mm，其长度超过70mm。
③压陷、黏底、焦花在条面或顶面上的凹陷或凸出超过2mm，区域最大投影尺寸同时大于20mm×30mm。

(5) 烧结多孔砖的尺寸偏差见表6-6。

表6-6　烧结多孔砖的尺寸偏差

单位：mm

尺寸	样本平均偏差	样本极差≤
200～300	±2.5	8.0
100～200	±2.0	7.0
＜100	±1.5	6.0

(6) 烧结多孔砖的孔型孔结构及孔洞率见表6-7。

表6-7　烧结多孔砖的孔型孔结构及孔洞率

孔型	孔洞尺寸/mm		最小外壁厚/mm	最小肋厚/mm	孔洞率(%)	孔洞排列
	孔宽度尺寸b	孔长度尺寸L				
矩形条孔或矩形孔	≤13	≤40	≥12	≥5	≥28	1. 所有孔宽应相等，孔采用单向或双向交错排列； 2. 孔洞排列上下、左右应对称，分布均匀，手抓孔的长度方向尺寸必须平行于砖的条面

注：(1)矩形孔的孔长L、孔宽b满足式$L \geqslant 3b$时，为矩形条孔。
(2)孔四个角应做成过渡圆角，不得做成直尖角。
(3)如设有砌筑砂浆槽，则砌筑砂浆槽不计算在孔洞率内。
(4)规格大的砖应设置手抓孔，手抓孔尺寸为(30～40)mm×(75～85)mm。

(7) 产品标记。按产品名称、品种、规格、强度等级、密度等级和标准编号顺序编写。如规格尺寸290mm×140mm×90mm、强度等级MU25、密度1 200级的黏土烧结多孔砖，其标记为：烧结多孔砖 N 290×140×90 MU25 1 200 GB 13544—2011。

2) 应用

烧结多孔砖可以代替烧结黏土砖，用于承重墙体，尤其在小城镇建设中用量非常大。在应用中，强度等级不低于MU10，最好在MU15以上。

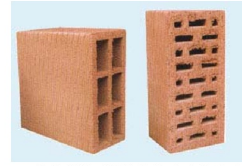


特别提示

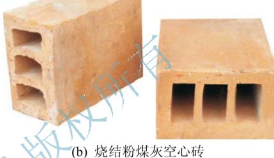
砌筑烧结普通砖、烧结多孔砖时，砖应提前 1～2d 适度润湿，严禁采用干砖或处于吸水饱和状态的砖。

2. 烧结空心砖

烧结空心砖是以黏土、页岩、煤矸石、粉煤灰等为原料，经焙烧制成的空洞率≥35%而且孔洞数量少、尺寸大的烧结砖，用于非承重墙和填充墙。各类烧结空心砖如图 6.5 所示。



(a) 烧结煤矸石多孔砖(右)与空心砖(左)



(b) 烧结粉煤灰空心砖

图 6.5 典型烧结空心砖和空心砌块

1) 技术规定

(1) 《烧结空心砖和空心砌块》(GB 13545—2003)规定：砖的外形为直角六面体，其长、宽、高应符合下列要求：390mm、290mm、240mm、190mm、180(175)mm、140mm、115mm、90mm。烧结空心砖和空心砌块基本构造如图 6.6 所示。

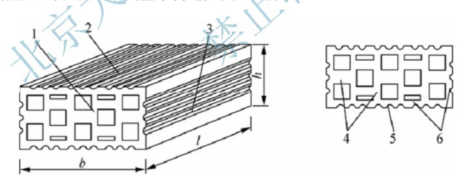


图 6.6 烧结空心砖和空心砌块示意图

1—顶面；2—大面；3—条面；4—肋；5—凹槽面；
6—壁；l—长；b—宽；h——高

(2) 体积密度分为 800、900、1 000、1 100 四个级别，见表 6-8。

表 6-8 烧结空心砖的密度等级

单位：kg/m^3

密度等级	5 块砖干燥表观密度平均值	密度等级	5 块砖干燥表观密度平均值
800	≤800	1 000	901～1 000
900	801～900	1 100	1 001～1 100

(3) 抗压强度分为 MU10.0、MU7.5、MU5.0、MU3.5、MU2.5 五个级别，见表 6-9。

表 6-9　烧结空心砖的强度等级

强度等级	抗压强度平均值 $\bar{f}$ ≥	变异系数 δ≤0.21 强度标准值 f_k ≥/ MPa	变异系数 δ>0.21 单块最小抗压强度 f_{min} >/MPa	密度等级范围/ kg/m^3
MU10.0	10.0	7.0	8.0	≤1 100
MU7.5	7.5	5.0	5.8	≤1 100
MU5.0	5.0	3.5	4.0	≤1 100
MU3.5	3.5	2.5	2.8	≤1 100
MU2.5	2.5	1.6	1.8	≤800

(4) 孔洞排列。孔洞一般位于砖的顶面或条面，单孔尺寸较大但数量较少，孔洞率高；孔洞方向与砖主要受力方向相垂直。孔洞对砖受力影响较大，因而烧结空心砖强度相对较低。孔洞率和孔洞排数应符合表 6-10 的规定。

表 6-10　烧结空心砖的孔洞排列及其结构

等级	孔洞排列	孔洞排数/排		孔洞率/%
		宽度方向	高度方向	
优等品	有序交错排列	b≥200mm，≥7 b<200mm，≥5	≥2	≥40
一等品	有序排列	b≥200mm，≥5 b<200mm，≥4	≥2	
合格品	有序排列	≥3	—	

(5) 等级。根据孔洞及排数、尺寸偏差、外观质量、强度等级和物理性能分为优等品(A)、一等品(B)、合格品(C)这 3 个等级。

(6) 产品标记。按产品名称、类别、规格、密度等级、强度等级、质量等级和标准编号顺序编写。如规格尺寸 290mm×190mm×90mm、密度等级 800、强度等级 MU7.5、优等品的页岩空心砖，其标记为：烧结空心砖 Y(290×190×90)800 MU 7.5A GB 13545。

2) 应用

烧结空心砖主要用作非承重墙，如多层建筑内隔墙或框架结构的填充墙等。使用空心砖强度等级不低于 MU3.5，最好在 MU5 以上，孔洞率应大于 45%，以横孔方向砌筑。

6.1.3　非烧结砖

不经焙烧而制成的砖均为非烧结砖。目前非烧结砖主要有蒸养砖、蒸压砖、碳化砖等，根据生产原材料区分主要有灰砂砖、粉煤灰砖、炉渣砖、混凝土多孔砖等。

1. *蒸压灰砂砖*

以石灰和砂加水混拌，压制成型，经蒸压养护而制成的砖，代号为 LSB，如图 6.7 所示。



图 6.7　蒸压灰砂砖

《蒸压灰砂砖》(GB 11945—1999)规定：砖的公称尺寸为 240mm×115mm×53mm，表观密度为 1 800～1 900kg/m^3，根据产品的尺寸偏差和外观分为优等品(A)、一等品(B)、合格品(C)这 3 个等级。

根据浸水 24h 后的抗压和抗折强度分为 MU25、MU20、MU15、MU10 四个等级。蒸压灰砂的砖强度指标和抗冻指标见表 6-11。

表 6-11　蒸压灰砂砖强度指标和抗冻指标

<table>
<tr><th rowspan="3">强度等级</th><th colspan="4">强度指标</th><th colspan="2">抗冻性指标</th></tr>
<tr><th colspan="2">抗压强度/MPa</th><th colspan="2">抗折强度/MPa</th><th rowspan="2">冻后抗压强度平均值/MPa≥</th><th rowspan="2">单块砖干质量损失/%≤</th></tr>
<tr><th>平均值≥</th><th>单块值≥</th><th>平均值≥</th><th>单块值≥</th></tr>
<tr><td>MU25</td><td>25.0</td><td>20.0</td><td>5.0</td><td>4.0</td><td>20.0</td><td rowspan="4">2.0</td></tr>
<tr><td>MU20</td><td>20.0</td><td>16.0</td><td>4.0</td><td>3.2</td><td>16.0</td></tr>
<tr><td>MU15</td><td>15.0</td><td>12.0</td><td>3.3</td><td>2.6</td><td>12.0</td></tr>
<tr><td>MU10</td><td>10.0</td><td>8.0</td><td>2.5</td><td>2.0</td><td>8.0</td></tr>
</table>

蒸压灰砂砖是在高压下成型，又经过蒸压养护，砖体组织致密，强度高、大气稳定性好、干缩率小、尺寸偏差小、外形光滑，其应用上应注意以下几点：

(1) 蒸压灰砂砖主要用于工业与民用建筑的墙体和基础。其中，MU15、MU20 和 MU25 的灰砂砖可用于基础及其他建筑，MU10 的灰砂砖仅可用于防潮层以上的建筑部位。

(2) 蒸压灰砂砖不得用于长期受热 200℃以上、受急冷急热或有酸性介质侵蚀的环境，也不宜用于受流水冲刷的部位。灰砂砖表面光滑平整，使用时注意提高砖与砂浆之间的黏结力。

(3) 蒸压灰砂砖早期收缩值大，出釜后应至少放置一个月后再用，以防止砌体的早期开裂。

(4) 蒸压灰砂砖砌体干缩较大，墙体在干燥环境中容易开裂，故在砌筑时砖的含水率宜控制在 5%～8%。干燥天气下，蒸压灰砂砖应在砌筑前 1～2d 浇水。禁止使用干砖或含饱和水的砖砌筑墙体。不宜在雨天施工。

(5) 蒸压灰砂砖与砂浆的黏结力较弱，故宜采用高黏度性能的专用砌筑砂浆砌筑。

(6) 蒸压灰砂砖砌体应控制每天可砌高度，一般不超过 1.5m 为宜，且不宜与其他品种砖同层混砌。

特别提示

蒸压灰砂砖生产(出釜)以后由于温度、湿度降低和碳化作用，在使用过程中总的趋势是体积发生收缩，与烧结普通砖砌体比较，蒸压灰砂砖砌体的收缩值要大得多。因此，灰砂砖砌体在设计与施工中须采取相应的抗裂措施。

2. 蒸压(蒸养)粉煤灰砖

粉煤灰砖是以粉煤灰、石灰或水泥为主要原料，掺加适量石膏、外加剂、颜料和集料，经坯料制备、压制成型，高压或常压蒸汽养护而成的砖。

《粉煤灰砖》(JC 239—2001)规定：粉煤灰砖的公称尺寸为 240mm×115mm×53mm，表观密度为 1 500kg/m^3，按抗压强度和抗折强度分为 MU30、MU25、MU20、MU15、MU10 五个等级。按外观质量、强度、抗冻性和干燥收缩分为优等品(A)、一等品(B)、合格品(C)。粉煤灰砖的强度指标和抗冻性指标见表 6-12。

表 6-12 粉煤灰砖强度指标和抗冻性指标

强度等级	抗压强度/MPa		抗折强度/MPa		抗冻性指标	
	10 块平均值≥	单块值≥	10 块平均值≥	单块值≥	抗压强度/MPa 平均值≥	单块砖的干质量损失/(%)≤
MU30	30.0	24.0	6.2	5.0	24.0	2.0
MU25	25.0	20.0	5.0	4.0	20.0	
MU20	20.0	16.0	4.0	3.2	16.0	
MU15	15.0	12.0	3.3	2.6	12.0	
MU10	10.0	8.0	2.5	2.0	8.0	

蒸压粉煤灰砖可用于工业与民用建筑的基础和墙体，但应注意以下几点。

(1) 在用于基础或易受冻融和干湿交替的部位，必须使用优等品或一等品砖，对砖要进行抗冻性检验，并用水泥砂浆抹面或在建筑设计上采取其他适当措施，以提高建筑物的其耐久性。

(2) 用粉煤灰砖砌筑的建筑物，应适当增设圈梁及伸缩缝，或减少伸缩缝间距；窗台、门、洞口等部位，适当增设钢筋，以避免或减少收缩裂缝的产生。

(3) 粉煤灰砖出釜后应存放 1～2 周后再用，以减少相对伸缩值。

(4) 长期受热高于 200℃，或受冷热交替作用，或有酸性侵蚀的建筑部位不得使用粉煤灰砖。

(5) 粉煤灰砖吸水迟缓，初始吸水较慢，后期吸水量大，故必须提前润水，不能随浇随砌。砖的含水率一般宜控制在 10%左右，以保证砌筑质量。

(6) 粉煤灰砖与砂浆的黏结力较弱，砌体抗横向变形能力较差，故应尽量采用专用砌筑砂浆，以提高砖与砂浆的黏结力。

3. 蒸压炉渣砖

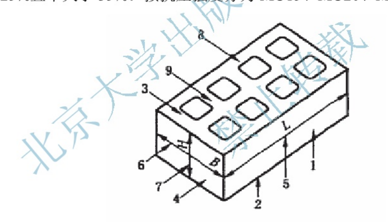
蒸压炉渣砖是以煤燃烧后的残渣为主要原料，配以一定数量的石灰和少量石膏，经加水搅拌混合、压制成型、蒸养或蒸压养护而制成的实心砖。

《炉渣砖》(JC/T 525—2007)规定：炉渣砖的公称尺寸同普通黏土砖 240mm×115mm×53mm。按抗压强度分为 MU25、MU20、MU15 三个等级。炉渣砖可用于一般工业与民用建筑的墙体和基础。炉渣砖的生产消耗大量工业废渣，属于环保型墙材。

4. 承重混凝土多孔砖

承重混凝土多孔砖是一种新型墙体材料，以水泥、砂、石等为主要集料，加水搅拌、压制成型、养护制成的一种用于承重结构的多排孔混凝土砖，代号 LPB。其制作工艺简单，施工方便。用混凝土多孔砖代替实心豁土砖、烧结多孔砖，可以不占耕地，节省豁土资源，且不用焙烧设备，节省能耗。

《承重混凝土多孔砖》(GB 25779—2010)规定：承重混凝土多孔砖的外形为直角六面体，产品的主要规格尺寸有为长度 360mm、290mm、240mm、190mm、140mm；宽度 240mm、190mm、115mm、90mm；高度 115mm、90mm。最小外壁厚不应小于 18mm，最小肋厚不应小于 15mm，典型规格如图 6.8 所示。为了减轻墙体自重及增加保温隔热功能，其孔洞率应不小于 25%且不大于 35%。按抗压强度分为 MU15、MU20、MU25 三个等级。



1—条面；2—坐浆面(外壁、肋厚度较小的面)；3—铺浆面(外壁、肋厚度较大的面)；
4—顶面；5—长度；6—宽度；7—高度；8—外壁；9—肋

图 6.8 混凝土多孔砖

承重混凝土多孔砖原料来源容易、生产工艺简单、成本低、保温隔热性能好、强度较高，且有较好的耐久性，多用于工业与民用建筑等承重结构。

特别提示

《砌体工程施工质量验收规范》(GB 50203—2011)规定，砖砌体工程抽检数量为：每一生产厂家。烧结普通砖、混凝土实心砖梅 15 万块，烧结多孔砖、混凝土多孔砖、蒸压灰砂砖及蒸压粉煤灰砖每 10 万块各为一验收批，不足上述数量时按 1 批计，抽检数量为 1 组。

6.2 砌　块



关于砌块墙体的裂纹和渗漏的案例分析

随着我国墙体材料改革工作的不断推进，作为新型墙体材料的主力军—砌块，正被越来越多地应用，因此砌块墙体存在的问题也越来越受人们的关注。砌块建筑存在的主要问题有三个方面：①建筑外墙隔热保温差；②室内二次整修不便；③建筑墙体裂缝。

某房屋，地处潮汕平原，使用两年后，出现多处墙体问题。在面向东西的墙体，窗口处有斜裂纹；在持续大雨的季节，有几处墙体有渗漏的现象出现；墙体有几处集中出现细裂纹。原因分析如下。

(1) 潮汕平原，处于亚热带，多雨，夏天气温高。夏天受日光照射强烈的墙体，内外墙温差较大，一般都在30℃以上，导致墙体出现剪应力，出现了具有“八”字形45° 斜裂纹。

(2) 对于墙体出现渗漏现象，可能与施工时砂浆不饱满有关，而更多在于所用的砌块材料不具备防水的功能。潮汕平原，多雨季节降雨量很大，持续时间也很长，因此在雨季出现墙体渗漏也就在所难免。

(3) 对于某几处墙体出现集中的细裂纹现象，是由于该处砌块含水过多干缩而引起细裂纹。施工时，砌块喷水过多，某些还泼了上去。由于砌块是成几堆堆放，泼水上去造成底部有积水现象，故下面砌块含水率变得特别高，因此在施工后用了底下的砌块的墙体干缩厉害，造成了裂纹。

砌块是比砖大的砌筑用人造石材，多为直角六面体，也有各种异形的。砌块系列中主规格尺寸的长度、宽度或高度，有一项或一项以上分别大于365mm、240mm、115mm，但高度不大于长度或宽度的6倍，长度不超过高度的3倍。

按产品主规格的尺寸，可分为大型砌块(高度大于980mm)、中型砌块(高度为380～980mm)和小型砌块(高度115～380mm)。按有无孔洞可分为实心砌块(无孔洞或空心率＜25%)和空心砌块(空心率≥25%)。

目前在国内推广应用较为普遍的有蒸压加气混凝土砌块、混凝土小型空心砌块、粉煤灰砌块、石膏砌块等。

6.2.1　蒸压加气混凝土砌块

蒸压加气混凝土砌块是钙质材料(水泥、石灰等)和硅质材料(矿渣和粉煤灰)加入铝粉(作加气剂)，经蒸压养护而成的多孔轻质块体材料，简称加气混凝土砌块，其代号为ACB。砌块示意图如图6.9所示。




图 6.9 蒸压加气混凝土砌块

1. 技术要求

1) 尺寸规定

《蒸压加气混凝土砌块》(GB/T 11968—2006)规定，长度：600mm；高度：200mm、240mm、250mm、300mm；宽度：100mm、120mm、125mm、150mm、180mm、200mm、240mm、250mm、300mm，如需要其他规格，可由供需双方协商解决。

2) 强度等级

按抗压强度可分为七个等级 A1.0、A2.0、A2.5、A3.5、A5.0、A7.5、A10.0，见表 6-13。

表 6-13 加气混凝土砌块各等级抗压强度

强度等级		A1.0	A2.0	A2.5	A3.5	A5.0	A7.5	A10.0
立方体抗压强度/MPa	平均值≥	1.0	2.0	2.5	3.5	5.0	7.5	10.0
	单块最小值≥	0.8	1.6	2.0	2.8	4.0	6.0	8.0

3) 密度等级

按干表观密度可分为 B03、B04、B05、B06、B07、B08 六个等级。

4) 质量等级

按尺寸偏差与外观质量、干密度、抗压强度和抗冻性等分为优等品(A)、合格品(B)。各强度级别的相关性能见表 6-14。

表 6-14 加气混凝土砌块的强度级别、干密度、干燥收缩、抗冻性、导热系数

干密度级别		B03	B04	B05	B06	B07	B08
强度级别	优等品	A1.0	A2.0	A3.5	A5.0	A7.5	A10.0
	合格品			A2.5	A3.5	A5.0	A7.5
干表观密度/(kg/m^3)	优等品	300	400	500	600	700	800
	合格品	350	425	525	625	725	825
干燥收缩值/(mm/m)	标准法	0.50					
	快测法	0.80					

续表

干密度级别			B03	B04	B05	B06	B07	B08
抗冻性	质量损失/(%)≤		5.0					
	冻后强度/MPa	优等品	0.8	1.6	2.8	4.0	6.0	8.0
		合格品			2.0	2.8	4.0	6.0
导热系数(干态)/[W/(m·K)]≤			0.10	0.12	0.14	0.16	0.18	0.20

5) 产品标识

蒸压加气混凝土砌块的产品标识由强度级别、干密度级别、等级、规格尺寸及标准编号五部分组成。如：强度级别为A3.5、干密度级别为B05、优等品、规格尺寸为600mm×200mm×250mm的蒸压加气混凝土砌块，其标记为：ACB A3.5 B05 600×200×250A GB 11968。

2. 应用

蒸压加气混凝土砌块常用品种有加气粉煤灰砌块、蒸压矿渣砂加气混凝土砌块。具有表观密度小、保温及耐火性好、易加工、抗震性好、施工方便的特点，适用于低层建筑的承重墙、多层建筑和高层建筑的隔离墙、填充墙及工业建筑物的维护墙体和绝热墙体。建筑的基础，处于浸水、高湿和化学侵蚀环境，承重制品表面温度高于80℃的部位，均不得采用加气混凝土砌块。加气混凝土外墙面，应做饰面防护措施。

蒸压加气混凝土砌块应存放5d以上方可出厂。加气混凝土砌块本身强度较低，搬运和堆放过程要尽量减少损坏。砌块储存堆放应做到场地平整，同品种、同规格、同等级做好标记，整齐稳妥，宜有防雨措施。产品运输时，宜成垛绑扎或有其他包装。绝热用产品必须捆扎加塑料薄膜封包。运输装卸宜用专用机具，严禁抛掷、倾倒翻卸。

6.2.2 混凝土小型空心砌块

混凝土小型空心砌块是以水泥为胶凝材料，砂、碎石或卵石、煤矸石、炉渣为集料，经加水搅拌、振动加压或冲压成型、养护而成的小型砌块。砌块示意图如图6.10所示。

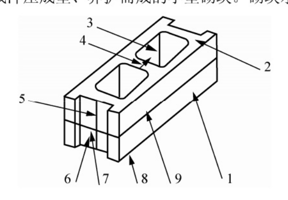


图6.10 混凝土小型空心砌块

1—条面；2—坐浆面(肋厚较小的面)；3—壁；4—肋；
5—高度；6—顶面；7—宽度；8—铺浆面(肋厚较大的面)；9—长度

《普通混凝土小型空心砌块》(GB 8239—1997)规定：砌块主规格尺寸为390mm×190mm×190mm，最小外壁厚不应小于30mm，最小肋厚不应小于25mm，空心率不应小于

25%。按抗压强度分为 MU3.5、MU5.0、MU7.5、MU10.0、MU15.0、MU20.0 六个等级，按其尺寸偏差，外观质量分为优等品(A)、一等品(B)、合格品(C)。

混凝土小型空心砌块建筑体系比较灵活，砌筑方便，主要适用于各种公用或民用住宅建筑以及工业厂房、仓库和农村建筑的内外墙体。为防止或避免小砌块因失水而产生的收缩导致墙体开裂，应特别注意：小砌块采用自然养护时，必须养护 28d 后方可上墙；出厂时小砌块的相对含水率必须严格控制；在施工现场堆放时，必须采用防雨措施；砌筑前，不允许浇水预湿；为防止墙体开裂，应根据建筑的情况设置伸缩缝，在必要的部位增加构造钢筋。

6.2.3 轻集料混凝土小型空心砌块

轻集料混凝土小型空心砌块是以陶粒、膨胀珍珠岩、浮石、火山渣、煤渣、自燃煤矸石等各种轻粗、细集料和水泥按一定比例配制，经搅拌、成型、养护而成的空心率大于或等于 25%、表观密度小于 1 400kg/m^3 的轻质混凝土小砌块，代号 LHB。轻集料混凝土小型空心砌块如图 6.11 所示。



图 6.11 轻集料混凝土小型空心砌块

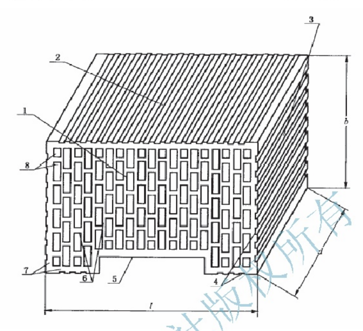
《轻集料混凝土小型空心砌块》(GB/T 15229—2011)规定：砌块的主规格为 390mm×190mm×190mm，强度等级为 MU1.5、MU2.5、MU3.5、MU5.0、MU7.5 和 MU10.0 六个等级，密度等级为 500、600、700、800、900、1 000、1 200、1 400 八个等级(实心砌块的密度等级不应大于 800)。与普通混凝土小型空心砌块相比，这种砌块重量更轻、保温隔热性能更佳、抗冻性更好，主要用于非承重结构的围护和框架结构的填充墙，也可用于既承重又保温或专门保温的墙体。

6.2.4 烧结多孔砌块

烧结多孔砌块经焙烧而成，孔洞率≥33%，孔的尺寸小而数量多。主要用于建筑物承重部位。

《烧结多孔砖和多孔砌块》(GB 13544—2011)规定：烧结多孔砌块按主要原料砖分为黏土砌块(N)、页岩砌块(Y)、煤矸石砌块(M)、粉煤灰砌块(F)、淤泥砌块(U)和固体废弃物砌块(G)。砌块为直角六面体，在与砂浆的接合面上应设有增加结合力的粉刷槽(设在条面或顶面上深度不小于 2mm 的沟或类似结构)和砌筑砂浆槽(设在条面或顶面上深度大于 15mm 的凹槽)。规格尺寸为：490mm、440mm、390mm、340mm、290mm、240mm、190mm、180mm、

140mm、115mm、90mm，如图 6.12 所示。强度等级分为 MU30、MU25、MU20、MU15、MU10 五个等级。密度等级分为 900、1 000、1 100、1 200 四个等级。



1—大面(坐浆面)；2—条面；3—顶面；4—粉刷沟槽；
5—砂浆槽；6—肋；7—外壁；8—孔洞；l—长度；b—宽度；d—高度

图 6.12 烧结多孔砌块

6.2.5 粉煤灰砌块

粉煤灰砌块可分为密实粉煤灰砌块和空心粉煤灰砌块，以粉煤灰混凝土小型空心砌块应用较为广泛。粉煤灰混凝土小型空心砌块是以粉煤灰、水泥、集料、水为主要组分(也可加入外加剂等)制成，代号 FHB。

《粉煤灰混凝土小型空心砌块》(JC/T 862—2008)规定：砌块主规格尺寸为 390mm×190mm×190mm。强度等级分为 MU3.5、MU5、MU7.5、MU10、MU15、MU20 六个等级。密度等级分为 600、700、800、900、1 000、1 200、1 400 七个等级。

粉煤灰砌块属于轻混凝土的范畴，适用于一般建筑的墙体和基础。不适用于有酸性侵蚀介质，密封性要求高、易受较大震动的建筑物以及受高温和受潮的承重墙。

6.2.6 石膏砌块

石膏砌块以建筑石膏为主要原料而生产。石膏砌块墙体能有效减轻建筑物自重，降低基础造价，提高抗震能力，并增加建筑的有效使用面积，因此是理想的轻质节能新型墙体材料。石膏砌块有实心、空心和夹芯砌块三种，如图 6.13 所示。其中空心石膏砌块体积密度小，绝热性能较好，应用较多。采用聚苯乙烯泡沫塑料为芯层可制成夹芯石膏砌块。石膏砌块轻质、绝热吸声、不燃、可锯可钉、生产工艺简单、成本低，多作非承重内隔墙，即可用作一般的分室隔墙，也可采取复合结构，用于隔声要求较高的隔墙。

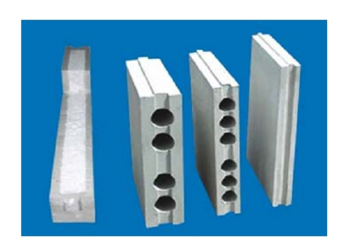


图 6.13　石膏砌块



特别提示

(1) 《砌体工程施工质量验收规范》(GB 50203—2011)规定，填充墙砌体砌筑前块材(指空心砖、轻集料混凝土小型空心砌块、加气混凝土砌块等砌材)应提前 1～2d 浇(喷)水湿润。蒸压加气混凝土砌块砌筑时，应在砌筑当天对砌块砌筑面喷水润湿。

(2) 空心砖施工时的适宜相对含水率为 60%～70%；轻集料混凝土小型空心砌块、加气混凝土砌块施工时的适宜相对含水率为 40%～50%。

6.3　墙用板材

墙用板材改变了墙体砌筑的传统工艺，通过黏结、组合等方法进行墙体施工，加快了建筑施工的速度。墙用板材除轻质外，还具有保温、隔热、隔声、防水及自承重的性能，有的轻型墙板还具有高强、绝热性能，目前在工程中应用十分广泛。

墙用板材的种类很多，主要包括加气混凝土板、石膏板、玻璃纤维增强水泥板、轻质隔热夹芯板等类型。

6.3.1　水泥类墙板

水泥类墙用板材具有较好的力学性能和耐久性，生产技术成熟，产品质量可靠，主要用于承重墙、外墙和复合外墙的外层面，但其表观密度大，抗拉强度低，体型较大的板材在施工中易受损。为减轻自重，同时增加保温隔热性，生产时可制成空心板材，也可加入一些纤维材料制成增强型板材，还可在水泥板材上制作具有装饰效果的表面层。

1. 预应力混凝土空心板

预应力混凝土空心板是以高强度的预应力钢绞线用先张法制成。可根据需要增设保温层、防水层、外饰面层等。《预应力混凝土空心板》(GB/T 14040—2007)规定，规格尺寸：高度宜为 120mm、180mm、240mm、300mm、360mm，宽度宜为 900mm、1 200mm，长度不宜大于高度的 40 倍，混凝土强度等级不应低于 C30，如用轻骨料混凝土浇筑，轻骨料混凝土强度等级不应低于 LC30。预应力混凝土空心板可用于承重或非承重的内外墙板、楼面板、屋面板、阳台板、雨篷等，如图 6.14 所示。



图 6.14 预应力混凝土空心板

特别提示

注意区分预应力混凝土空心板和预应力混凝土屋面板。

2. 玻璃纤维增强水泥(GRC)轻质多孔墙板

GRC 轻质多孔墙板是用抗碱玻璃纤维作增强材料，以水泥砂浆为胶结材料，经成型、养护而成的一种复合材料，GRC 是“Glass Fiber Reinforced Cement(玻璃纤维增强水泥)”的缩写。GRC 轻质多孔墙板具有重量轻、强度高、隔热、隔声、不燃、加工方便、价格适中、施工简便等优点，可用于一般建筑物的内隔墙和复合墙体的外墙面，如图 6.15 所示。

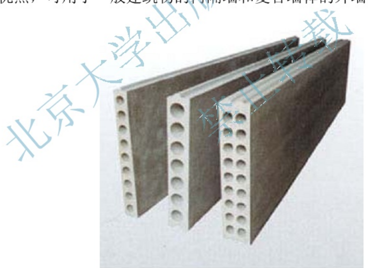


图 6.15 GRC 轻质多孔墙板

3. 蒸压加气混凝土条板

蒸压加气混凝土条板是以水泥、石灰和硅质材料为基本原料，以铝粉为发气剂，配以钢筋网片，经过配料、搅拌、成型和蒸压养护等工艺制成的轻质板材。加气混凝土条板具有密度小，保温性能好，良好的防火及抗震性能，可钉、可锯、容易加工等特点，主要用于工业与民用建筑的外墙和内隔墙。由于蒸压加气混凝土板材中含有大量微小的非连通气孔，孔隙率达 70%～80%，因而具有自重轻、绝热性好、隔声吸声等优点，施工时不需吊装，人工即可安装，施工速度快，该板还具有较好的耐火性与一定的承载能力，被广泛应用于工业与民用建筑的各种非承重隔墙。

6.3.2 石膏类墙板

石膏板主要有纸面石膏板、纤维石膏板及石膏空心条板3类。

1. 纸面石膏板

纸面石膏板是以建筑石膏为主要原料，并掺入某些纤维和外加剂所组成的芯材，和与芯材牢固地结合在一起的护面纸所组成的建筑板材，如图6.16所示。纸面石膏板主要包括普通纸面石膏板、耐水纸面石膏板、耐火纸面石膏板、耐水耐火纸面石膏板。



图6.16 纸面石膏板

纸面石膏板具有轻质、高强、绝热、防火、防水、吸声、可加工、施工方便等特点。普通纸面石膏板适用于建筑物的围护墙、内隔墙和吊顶。在厨房、厕所以及空气相对湿度大于70%的潮湿环境使用时，必须采用相应防潮措施。耐火纸面石膏板主要用于对防火要求较高的建筑工程，如档案室、楼梯间、易燃厂房和库房的墙面和顶棚。耐水纸面石膏板主要用于相对湿度大于75%的浴室、厕所、盥洗室等潮湿环境下的吊顶和隔墙。

2. 纤维石膏板

纤维石膏板是以建筑石膏为主要原料，加入适量有机或无机纤维和外加剂，经打浆、铺浆脱水、成型、干燥而成的一种板材。石膏硬化体脆性较大，且强度不高。加入纤维材料可使板材的韧性增加，强度提高。纤维石膏板中加入的纤维较多，一般在10%左右，常用纤维类型多为纸纤维、木纤维、甘纤维、草纤维、玻璃纤维等。纤维石膏板具有质轻、高强、隔声、阻燃、韧性好、抗冲击力强、抗裂防震性能好等特点，可锯、钉、刨、粘，施工简便，主要用于非承重内隔墙、天花板、内墙贴面等。

3. 石膏空心板

石膏空心板是以石膏为胶凝材料，加入适量轻质材料(如膨胀珍珠岩等)和改性材料(如水泥、石灰、粉煤灰、外加剂等)，经搅拌、成型、抽芯、干燥等工序制成的空心条板。加工性好、自重轻、颜色洁白、表面平整光滑，可在板面喷刷或粘贴各种饰面材料，空心部位可预埋电线和管件，施工安装时不用龙骨，施工简单且效率高，主要用于非承重内隔墙。

6.3.3 复合墙板

复合墙板是将不同功能的材料分层复合而制成的墙板。一般由外层、中间层和内层组

成。外层用防水或装饰材料做成，主要起防水或装饰作用；中间层为减轻自重而掺入的各种填充性材料，有保温、隔热、隔声作用；内层为饰面层。内外层之间多用龙骨或板勒连接，以增加承载力。目前，建筑工程中已广泛使用各种复合板材。

1. 钢丝网夹芯复合板材

钢丝网夹芯复合板材是将聚苯乙烯泡沫塑料、岩棉、玻璃棉等轻质芯材夹在中间，两片钢丝网之间用“之”字形钢丝相互连接，形成稳定的三维网架结构，然后用水泥砂浆在两侧抹面，或进行其他饰面装饰。

钢丝网夹芯复合板材商品名称众多，包括泰柏板、钢丝网架夹芯板、GY 板等，但其基本结构相近，如图 6.17 所示。

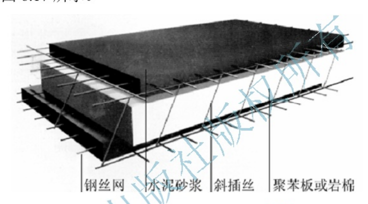


图 6.17 钢丝网夹芯板材构造示意图

钢丝网夹芯复合板材自重轻，约为 3.9～4.0kg/m^2，其热阻约为 240mm 厚普通砖墙的两倍，具有良好的保温隔热性，另外还具有隔声性好、防火性、抗湿、冻性能好、抗震能力强、耐久性好等特点，板材运输方便、损耗极低，施工方便，与砖墙相比，可有效提高建筑使用面积。可用作墙板、屋面板和各种保温板。

2. 金属面夹芯板

金属面夹芯板是以阻燃型聚苯乙烯泡沫塑料、聚氨酯泡沫塑料或岩棉、矿渣棉为芯材，两侧粘上彩色压型(或平面)镀锌板材复合形成，如图 6.18 所示。外露的彩色钢板表面一般涂以高级彩色塑料涂层，使其具有良好的抗腐性和耐气候性。



图 6.18 金属面夹芯板

金属面夹芯板重量为 10～25kg/m^2，质轻、高强、绝热性好，保温、隔热性好，防水性好，可加工性能好，且具有较好的抗弯、抗剪等力学性能，施工方便，安装灵活快捷，经久耐用，可多次拆装和重复使用，适用于各类墙体和屋面。

本任务小结

合理选用墙体材料对建筑物的功能、造价及安全等有重要意义。本任务主要讲述了各类墙砖、砌块的规格、性能及应用，并介绍了新型节能利废的墙体材料。

砌墙砖分烧结砖和非烧结砖两大类。烧结砖有烧结普通砖、烧结多孔砖和烧结空心砖。烧结砖有强度高、耐久性好、取材方便、生产工艺简单。价格低廉等优势，但生产率低，且要消耗大量土地资源，逐步会被禁止或限制生产和使用；非烧结砖种类很多，常用的有灰砂砖、粉煤灰砖和炉渣砖。这些砖强度高，完全可取代普通烧结砖用于一般的工业与民用建筑，但在受急冷急热或有腐蚀性介质的环境使用时应慎用。

常用的砌块有普通混凝土小型砌块、加气混凝土砌块和粉煤灰砌块等。其中，加气混凝土砌块以其质量轻、保温隔热性能好、施工方便等优点，广泛用于各类非承重隔墙。

墙用板材有石膏类板材、水泥类板材和复合墙板。随着建筑业的发展，复合类板材应用越来越广泛，它以轻质高强、耐久性好、施工效率高，集保温、隔热、吸声、防水、装饰于一体等诸多优点而发展前景广阔。

习题

一、填空题

1．目前所用的墙体材料有__________、__________和__________3大类。
2．烧结普通砖具有__________、__________、__________和__________等缺点。
3．常用的墙用板材__________、__________和__________3大类。
4．烧结普通砖的外形为直角六面体，其标准尺寸为__________。

二、选择题

1．下面哪些不是加气混凝土砌块的特点(　　)。
A．轻质　　B．保温隔热
C．加工性能好　　D．韧性好

2．利用煤矸石和粉煤灰等工业废渣烧砖，可以(　　)。
A．减少环境污染　　B．节约大片良田黏土
C．节省大量燃料煤　　D．大幅提高产量

3．普通黏土砖评定强度等级的依据是(　　)。
A、抗压强度的平均值　　B．抗折强度的平均值
C．抗压强度的单块最小值　　D．抗折强度的单块最小值

三、简答题

1．砌墙砖有几类？是怎样划分的？
2．未烧透的欠火砖为何不宜用于地下？
3．烧结普通砖、多孔砖强度等级是怎样确定的？

4．有烧结多孔砖一批，经抽样检测抗压强度，其结果见表6-15。试确定该砖强度等级。

表6-15 简答题4图

砖编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
破坏荷载/kN	254	270	218	183	238	259	151	280	220	254

5．常用的砌块有哪几种？

6．加气混凝土砌块砌筑的墙抹砂浆层，采用与砌筑烧结普通砖的办法往墙上浇水后即抹，一般的砂浆往往易被加气混凝土吸去水分而容易干裂或空鼓，请分析原因。

7．在各类墙用板材中，哪些不宜长期用于潮湿的环境中？哪些不宜长期用于大于200℃的环境中？

8．通过搜集相关资料，列出本省(市、地区)禁止或限制使用烧结黏土砖、推广新型墙体材料的具体措施。



学习任务 7

建 筑 钢 材

学习目标

本任务介绍了建筑钢材的分类、性质、技术标准及选用原则。通过学习应了解钢的冶炼和分类，了解钢材的加工性质，掌握建筑钢材的主要力学性能和工艺性能，掌握建筑用钢材的标准和应用，了解钢材防锈和防火的做法，熟悉钢材验收和储运的基本要求。

学习要求

能力目标	知识要点	权重
了解钢的冶炼和分类	钢的冶炼和分类	10%
掌握建筑钢材的主要力学性能和工艺性能	建筑钢材的主要力学性能和工艺性能	30%
了解钢材的加工性质	钢材的冷加工、热处理	10%
掌握建筑用钢材的标准和应用	钢结构和混凝土用钢材的标准和应用	35%
了解钢材防锈和防火的做法	钢材防锈机理及做法、防火措施	5%
熟悉钢材验收和储运的基本要求	钢材验收要求、储运规定	10%

任务导读

建筑钢材是建筑用黑色和有色金属材料以及它们与其他材料所组成的复合材料的统称，如图 7.1 所示。建筑用金属材料是构成土木工程物质基础的四大类材料(钢材、水泥混凝土、木材、塑料)之一。在钢铁流通行业，建筑钢材如无特殊说明，一般指建筑类钢材中使用量最大的线材及螺纹钢。建筑业主要采用黑色金属材料中的钢材，铸铁主要用作铸铁制品(如压力管等)。中国建筑用钢多数是采用平炉和氧气顶吹转炉冶炼的低碳钢(碳含量小于 0.25%)、中碳钢(碳含量 0.25%～0.60%)及低合金钢，并以沸腾钢或镇静钢工艺生产，其中沸腾钢因冲击、时效、冷脆性能较镇静钢差，使用时在某些结构中有所限制，如铁路桥梁、重级工作制吊车梁等。半镇静钢机械性能优于沸腾钢而接近镇静钢，其成品收得率却接近沸腾钢，在中国已被推广使用。



(a) 建筑钢材

(b) 螺纹钢



(c) 建筑物中的建筑钢材

图 7.1 建筑钢材图例



知识点滴

建筑钢材的发展

17世纪70年代，人类开始大量应用生铁作建筑材料，到19世纪初期发展到用熟铁建造桥梁、房屋等。这些材料因强度低、综合性能差，在使用上受到限制，但已是人们采用钢铁结构的开始。中期以后，钢材的规格品种日益增多，强度不断提高，相应的连接等工艺技术也得到发展，为建筑结构向大跨重载方向发展奠定了基础，带来了土木工程的一次飞跃。

19世纪50年代出现了新型的复合建筑材料——钢筋混凝土。至20世纪30年代，高强钢材的出现又推动了预应力混凝土的发展，开创了钢筋混凝土和预应力混凝土占统治地位的新的历史时期，使土木工程发生了新的飞跃。

与此同时，各国先后推广具有低碳、低合金(加入5%以下合金元素)、高强度、良好的韧性和可焊性以及耐腐蚀性等综合性能的低合金钢。随着桥梁大型化，建筑物和构筑物向大跨、高层、高耸发展以及能源和海洋平台的开发，低合金钢的产量在近30年来已大幅度增长，其在主要产钢国的产量已占钢材总产量的7%～10%，个别国家达20%以上，其中35%～50%用于房屋建筑和土木工程，主要为钢筋、钢结构用型材、板材，而且土木工程钢结构用低合金钢的比例已从10%提高到30%以上。近年来，各国大力发展不同于普通钢材品种的各种高效钢材，其中包括低合金钢材、热强化钢材、冷加工钢材、经济断面钢材，以及镀层、涂层、复合、表面处理钢材等，经在建筑业中使用，已取得明显的经济效益。



引　例

2009年6月27日清晨5时30分许，上海闵行区莲花南路罗阳路附近在建的“莲花河畔景苑”小区工地内，13层高的7号楼向南整体倾倒，致使一名工人死亡，如图7.2所示。事件发生后，该楼奇异的倒塌方式和对在建楼房工程质量的质疑被社会各界所关注。在专家组出动鉴定事故原因的同时，住房和城乡建设部下发紧急通知，要求全国各省、自治区、直辖市房屋建设主管部门，对在建住宅工程质量进行检查，并由此引发了建筑钢材市场的强烈震动。



图7.2　上海楼房倒塌现场

在专家组调查过程中，各界对倒塌原因的最普遍猜测，是工程使用了劣质钢筋，期间有网友通过倒塌现场图片论证，裸露在外的钢筋数量屈指可数，且质地较细软，更多网友则以地基中混凝土管中少见钢筋为由断定地基施工系豆腐渣工程，钢筋质量再度成为关注焦点。

实际上由于钢筋质量问题导致的建筑工程事故，在过往中已经屡见不鲜。从 1999 年 1 月，重庆綦江彩虹桥由于使用了劣质钢材，在建成 3 年后轰然倒塌，致 40 人死于非命。到 2007 年 5 月，通辽市村民在建房时使用劣质钢材，房屋突然发生坍塌，造成 45 人伤亡，其中 16 人死亡。在此期间使用劣质钢筋的惨痛教训并没有使得不合格钢筋数量有所减少，相反，在利益的驱动下，近些年专注生产建筑用螺纹线材的小厂如雨后春笋在全国各地快速蔓延。各种型号材质不一的品牌不计其数，甚至在一些重点市场，假冒伪劣的地条钢也卖得十分红火，这着实为建筑工程质量埋下了极大隐患。各地政府质检机构对此也多次进行查处，上海工商部门 2008 年曾对 52 个批次的钢筋产品进行了抽查，共涉及三家钢材批发市场和 15 个在建工程。经检测，有 25 个批次的钢筋质量合格，抽查合格率为 48%左右。其中，在建工程使用的钢筋质量合格率仅为 44.7%。但由于涉及地方财政收入，对于此类不合格产品的处罚力度并不十分强硬。

2008 年 7 月，上海虹口区局曾对中建三局建设工程股份有限公司在上海骏丰国际财富广场建筑工地上使用的钢筋实施了抽样检查。经检验，上述规格钢筋均不符合国家强制性标准，被判为不合格，并经查证属实，产品质量证明书均系伪造。当时涉案钢筋共计数量 130 余吨，货值金额 60 万余元，虹口区局对钢筋供应商做出了没收违法产品、没收违法所得和处货值金额等值的行政处罚。但并没有对钢筋生产厂家，以及市面上所流通的其他类似产品进行追查清剿，因此，在华东一代市场质检抽查一过，工厂照样开工，商家依旧经营，不合格产品始终在市场流通旺盛。

然而，这次的楼房倒塌事件给建筑钢材市场带来的冲击却不容轻视，上海当地市场对事件的反应同以往相比也有所不同。鉴于塌楼事件影响极大，住房和城乡建设部下发紧急通知，要求全国各省、自治区、直辖市房屋建设主管部门，对在建住宅工程质量进行检查。涉及结构安全重大隐患的，要立即停工整改，隐患消除前不得复工。而此次检查力度相对以往较强，涉及范围包括保障性住房和商品住房等各类在建住宅工程。主要是检查工程实体质量情况，特别是工程地基基础和主体结构的勘察、设计及施工质量。对建设、勘察、设计、施工、监理等责任主体和施工图审查、质量检测等有关单位及项目经理、总监理工程师等执业人员执行国家法律、法规和工程建设强制性标准的情况都要进行检查。

虽说在 7 月 3 日，已经对外公布了倒塌楼房的调查结果——“两侧压力差是主因”。但在住房和城乡建设部通知要求下，全国范围内的质检行动已经开展起来，尤其是华东一带市场，对建筑钢材质量的检查并没有因为“压力差”而有所松懈。在此影响下，不少工地主动向钢贸商打招呼要求停供钢筋；也有从事劣质钢筋销售的货主主动撤柜并向钢厂要求退货；据说还有些长年坚持超标生产且绝不整改的小钢厂现在主动按国标生产合格品。

通过类似措施的实行，一方面使得不合格建材市场大范围压缩；另一方面鼓励了国标材的生产流通，为合格名单上的商家扩大了销路。目前华东一带市场，国标材销量有所增加，江浙一些小厂，集体检修或停产，国标材市价有所上扬。

此次事件的影响深远，全国范围内对工程质量的检查均得到大力加强。大连甘井子区建筑安全监督站站长马宗堂表示，“小的隐患也容易引发重大事故。这次上海倒塌事故，对我们是一个深刻教训”。区建筑工程质量监督站工作人员则对在建楼盘结构安全进行重点检查，钢筋是检

查的“第一关”。使用钢筋定位仪等先进探测设备，可以通过脉冲感应到单位面积中钢筋个数，不但可以知道钢筋保护层的厚度，还能判断钢筋分布是否合理，在混凝土内具体位置是不是和设计一致。

上海塌楼事件已经引发了一次建筑钢材市场的地震波，局部市场建筑钢材资源结构已经悄然发生变化，而这种变化是否能演变成一场变革，建筑钢材的市场秩序能否得到有效改善，建筑工程用钢的质量能否从此得到保障，只能抱有一个好的希望，拭目以待。

7.1 钢材冶炼与分类

建筑钢材是指用于工程建设的各种钢材，现代建筑工程中大量使用的钢材主要有两大类：一类是钢筋混凝土用钢材，与混凝土共同构成受力构件；另一类则是钢结构用钢材，充分利用其轻质高强的优点，用于建造大跨度、大空间或超高层建筑。此外，还包括用作门窗和建筑五金等钢材。

建筑钢材强度高、品质均匀，具有一定的弹性和塑性变形能力，能承受冲击振动荷载。钢材还具有很好的加工性能，可以铸造、锻压、焊接、铆接和切割，装配施工方便。建筑钢材广泛用于大跨度结构、多层及高层建筑、受动力荷载结构和重型工业厂房结构、钢筋混凝土之中，是最重要的建筑结构材料之一。但钢材也存在能耗大、成本高、容易生锈、维护费用大、耐火性差等缺点。

7.1.1 钢材的冶炼

钢和铁的主要成分都是铁和碳，用含碳量的多少加以区分，含碳量大于 2.06%的铁碳合金为生铁，小于 2.06%的铁碳合金为钢，钢是由生铁冶炼而成。生铁是由铁矿石、焦炭和少量石灰石等在高温作用下进行还原反应和其他化学反应，铁矿石中的氧化铁形成金属铁，然后再吸收碳而成生铁。生铁的主要成分是铁，但含有较多的碳及硫、磷、硅、锰等杂质，杂质使得生铁的性质硬而脆，塑性很差，抗拉强度很低，使用受到很大的限制。炼钢的目的就是通过冶炼将生铁中的含碳量降至 2.06%以下，其他杂质含量降至一定的范围内，以显著改善其技术性能，提高质量。

钢的冶炼方法主要有氧气转炉法、电炉法和平炉法 3 种，不同的冶炼方法对钢材的质量有着不同的影响，见表 7-1。目前，氧气转炉法已成为现代炼钢的主要方法，而平炉法则已基本被淘汰。

表 7-1 炼钢方法的特点和应用

炉　　种	原　　料	特　　点	生产钢种
氧气转炉	铁水、废钢	冶炼速度快，生产效率高，钢质较好	碳素钢、低合金钢
电炉	废钢	容积小，耗电大，控制严格，钢质好，但成本高	合金钢、优质碳素钢
平炉	生铁、废钢	容量大，冶炼时间长，钢质较好且稳定，成本较高	碳素钢、低合金钢

7.1.2　钢的分类

钢的分类方法很多，其基本分类方法见表 7-2。

表 7-2　钢的分类

分类方法	类　别		特　性	应　用
按化学成分分类	碳素钢	低碳钢	含碳量＜0.25%	在建筑工程中主要用的是低碳钢和中碳钢
		中碳钢	含碳量 0.25%～0.60%	
		高碳钢	含碳量＞0.60%	
	合金钢	低合金钢	合金元素总含量＜5%	建筑上常用低合金钢
		中合金钢	合金元素总含量 5%～10%	
		高合金钢	合金元素总含量＞10%	
按脱氧程度分类	沸腾钢		脱氧不完全，硫、磷等杂质偏析较严重，代号为“F”	但其生产成本低、产量高、可广泛用于一般的建筑工程
	镇静钢		脱氧完全，同时去硫，代号为“Z”	适用于承受冲击荷载、预应力混凝土等重要结构工程
	半镇静钢		脱氧程度介于沸腾钢和镇静钢之间，代号为“B”	为质量较好的钢
	特殊镇静钢		比镇静钢脱氧程度还要充分彻底，代号为“TZ”	适用于特别重要的结构工程
按质量分类	普通钢		含硫量≤0.055%～0.065%，含磷量≤0.045%～0.085%	建筑中常用普通钢，有时也用优质钢
	优质钢		含硫量≤0.03%～0.045%，含磷量≤0.035%～0.045%	
	高级优质钢		含硫量≤0.02%～0.03%，含磷量≤0.027～0.035%	
	特级优质钢		硫含量≤0.025%，磷含量≤0.015%	
按用途分类	结构钢		工程结构构件用钢、机械制造用钢	建筑上常用的是结构钢
	工具钢		主要用作各种量具、刀具及模具的钢	
	特殊钢		具有特殊物理、化学或机械性能的钢，如不锈钢、耐酸钢和耐热钢等	



(1) 目前在建筑工程中常用的钢种是普通碳素结构钢中的低碳钢和低合金钢中的高强度结构钢。

(2) 沸腾钢的产量已逐渐下降并被镇静钢所取代。



1. 偏析

在铸锭冷却过程中，由于钢内某些元素在铁的液相中的溶解度大于固相，这些元素便向凝固较迟的钢锭中心集中，导致化学成分在钢锭中分布不均匀，这种现象称为化学偏析，其中以

硫、磷偏析最为严重。偏析会严重降低钢材的质量。

2. 脱氧

在冶炼钢的过程中，由于氧化作用使部分铁被氧化成 FeO，使钢的质量降低，因而在炼钢后期精炼时，需在炉内或钢包中加入锰铁、硅铁或铝锭等脱氧剂进行脱氧，脱氧剂与 FeO 反应生成 MnO_2、SiO_2 或 Al_2O_3 等氧化物，它们成为钢渣而被除去。若脱氧不完全，钢水浇入锭模时，会有大量的 CO 气体从钢水中逸出，引起钢水呈沸腾状，产生所谓沸腾钢。沸腾钢组织不够致密，成分不太均匀，硫、磷等杂质偏析较严重，故钢材的质量差。

7.2 钢材的主要技术性能

钢材的性能主要包括力学性能、工艺性能和化学性能等。只有了解、掌握钢材的各种性能，才能做到正确、经济、合理地选择和使用钢材。

7.2.1 钢材的力学性能

1. 拉伸性能

拉伸是建筑钢材的主要受力形式，所以拉伸性能是表示钢材性能和选用钢材的重要指标。将低碳钢(软钢)制成一定规格的试件，放在材料试验机上进行拉伸试验，就可以绘出图 7.3 所示的应力-应变关系曲线。从图中可以看出，低碳钢受拉至拉断，经历了 4 个阶段：弹性阶段(*O*—*A*)、屈服阶段(*A*—*B*)、强化阶段(*B*—*C*)和缩颈阶段(*C*—*D*)。

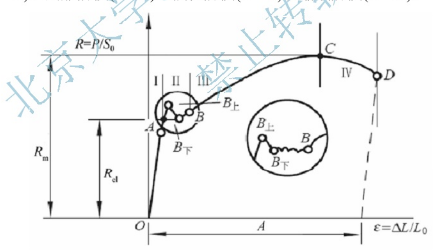


图 7.3 低碳钢受拉的应力-应变图

1) 弹性阶段

曲线中 *O*—*A* 段是一条直线，应力与应变成正比。如卸去外力，试件能恢复原来的形状，这种性质即为弹性，此阶段的变形为弹性变形，与 *A* 点对应的应力称为弹性极限。在弹性受力范围内，应力与应变的比值为常数，*E* 的单位为 MPa，例如 Q235 钢的 $E=0.21\times10^6$MPa，25MnSi 钢的 $E=0.2\times10^6$MPa。弹性模量反映钢材抵抗弹性变形的能力，是钢材在受力条件下计算结构变形的重要指标。

2) 屈服阶段

应力超过 *A* 点后，应力、应变不再成正比关系，开始出现塑性变形。应力的增长滞后

于应变的增长，当应力达 $B_{上}$点后(屈服上限)，瞬时下降至 $B_{下}$点(屈服下限)，变形迅速增加，而此时外力则大致在恒定的位置上波动，直到 B 点，这就是所谓的“屈服现象”，似乎钢材不能承受外力而屈服，所以 A—B 段称为屈服阶段。与 $B_{下}$点(此点较稳定、易测定)对应的应力称为屈服点(屈服强度)，用 R_{el} 表示。常用碳素结构钢 Q235 的屈服极限 R_{el} 不应低于 235MPa。

中碳钢与高碳钢(硬钢)的拉伸曲线与低碳钢不同，屈服现象不明显，难以测定屈服点，则规定产生残余变形为原标距长度的 0.2%时所对应的应力值作为硬钢的屈服强度，也称条件屈服强度，用 $R_{p0.2}$ 表示，如图 7.4 所示。

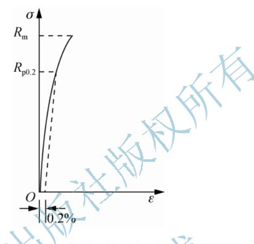


图 7.4　中、高碳钢的应力−应变图

3) 强化阶段

应力超过屈服点后，由于钢材内部组织中的晶格发生了畸变，阻止了晶格进一步滑移，钢材得到强化，所以钢材抵抗塑性变形的能力又重新提高，B—C 段呈上升曲线，称为强化阶段。对应于最高点 C 的应力值(R_m)称为极限抗拉强度，简称抗拉强度。显然，R_m 是钢材受拉时所能承受的最大应力值，Q235 钢约为 380MPa。钢材受力大于屈服点后，会出现较大的塑性变形，已不能满足使用要求，因此屈服强度是设计钢材强度取值的依据，是工程结构计算中非常重要的一个参数。屈服强度和抗拉强度之比(即屈强比＝R_{el}/R_m)能反映钢材的利用率和结构安全可靠程度。屈强比越小，其结构的安全可靠程度越高，但屈强比过小，又说明钢材强度的利用率偏低，造成钢材浪费。建筑结构钢合理的屈强比一般为 0.60～0.75。

4) 缩颈阶段

试件受力达到最高点 C 点后，其抵抗变形的能力明显降低，变形迅速发展，应力逐渐下降，试件被拉长，在有杂质或缺陷处，断面急剧缩小直到断裂，故 C—D 段称为缩颈阶段。

建筑钢材应具有很好的塑性。钢材的塑性通常用断后伸长率和断面收缩率表示。将拉断后的试件拼合起来，测定出标距范围内的长度 L_u(mm)，其与试件原标距 L_0(mm)之差称为塑性变形值，塑性变形值与 L_0 之比称为断后伸长率(A)，如图 7.5 所示。试件断面处面积收缩量与原面积之比称为断面收缩率(Z)。伸长率(A)、断面收缩率(Z)计算公式如下：

$$A=\frac{L_u-L_0}{L_0}\times100\% \tag{7-1}$$

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \times 100\% \tag{7-2}$$

断后伸长率是衡量钢材塑性的一个重要指标，A 越大说明钢材的塑性越好，而一定的塑性变形能力可保证应力重新分布，避免应力集中，从而使钢材用于结构的安全性越大。

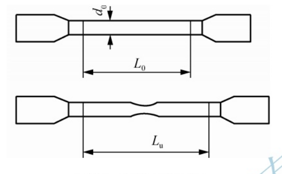


图 7.5　钢材的伸长率

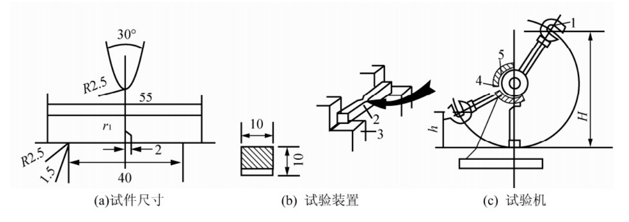
塑性变形在试件标距内的分布是不均匀的，缩颈处的变形最大，离缩颈部位越远其变形越小，所以原标距与直径之比越小，则缩颈处伸长值在整个伸长值中的比重越大，计算出来的 A 值就大。A 和 Z 都是表示钢材塑性大小的指标。



钢材在拉伸试验中得到的屈服点强度 R_{eL}、抗拉强度 R_m、伸长率 A 是确定钢材牌号或等级的主要技术指标。

2. 冲击韧度

与抵抗冲击作用有关的钢材性能是韧性，韧性是钢材断裂时吸收机械能能力的量度。吸收较多能量才断裂的钢材是韧性好的钢材。在实际工作中，用冲击韧度衡量钢材抗脆断的性能，因为实际结构中脆性断裂并不发生在单向受拉的地方，而总是发生在有缺口高峰应力的地方，在缺口高峰应力的地方常呈三向受拉的应力状态。因此，最有代表性的是钢材的缺口冲击韧度(简称冲击韧度或冲击功)，它是以试件冲断时缺口处单位面积上所消耗的功(J/cm^2)来表示，其符号为 a_k。试验时将试件放置在固定支座上，然后以摆锤冲击试件刻槽的背面，使试件承受冲击弯曲而断裂，如图 7.6 所示。显然，a_k 值越大，钢材的冲击韧度越好。



(a)试件尺寸　(b) 试验装置　(c) 试验机

图 7.6　冲击韧度试验图

1—摆锤；2—试件；3—试验台；4—刻度盘；5—指针

影响钢材冲击韧度的因素很多，如化学成分、冶炼质量、冷作及时效、环境温度等。当钢材内硫、磷的含量高，存在化学偏析，含有非金属夹杂物及焊接形成的微裂纹时，都会使冲击韧度显著降低。同时环境温度对钢材的冲击功影响也很大。试验表明，冲击韧度随温度的降低而下降，开始时下降缓和，当达到一定温度范围时，突然下降很多而呈脆性，这种性质称为钢材的冷脆性。这时的温度称为脆性临界温度，它的数值越低，钢材的低温冲击性能越好。

3. 耐疲劳性

受交变荷载反复作用，钢材在应力低于其屈服强度的情况下突然发生脆性断裂破坏的现象，称为疲劳破坏。钢材的疲劳破坏一般是由拉应力引起的，首先在局部开始形成细小断裂，随后由于微裂纹尖端的应力集中而使其逐渐扩大，直至突然发生瞬时疲劳断裂。疲劳破坏是在低应力状态下突然发生的，所以危害极大，往往造成灾难性的事故。

在一定条件下，钢材疲劳破坏的应力值随应力循环次数的增加而降低，如图 7.7 所示。钢材在无穷次交变荷载作用下而不致引起断裂的最大循环应力值，称为疲劳强度极限，实际测量时常以 2×10^6 次应力循环为基准。钢材的疲劳强度与很多因素有关，如组织结构、表面状态、合金成分、夹杂物和应力集中几种情况。一般来说，钢材的抗拉强度高，其疲劳极限也高。

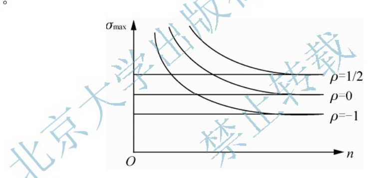


图 7.7 疲劳曲线

4. 硬度

钢材的硬度是指其表面抵抗硬物压入产生局部变形的能力。测定钢材硬度的方法有布氏法、洛氏法和维氏法等。建筑钢材常用布氏硬度表示，其代号为 *HB*。

布氏法的测定原理是利用直径为 D(mm)的淬火钢球，以荷载 P(N)将其压入试件表面，经规定的持续时间后卸去荷载，得直径为 d(mm)的压痕，以压痕表面积 A(mm^2)除荷载 P，即得布氏硬度(*HB*)值，此值无量纲。布氏硬度的测定，如图 7.8 所示。

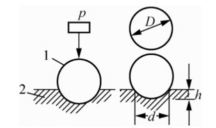


图 7.8 布氏硬度的测定

1—淬火钢球；2—试件

知识链接

材料的硬度是材料弹性、塑性、强度等性能的综合反映。实验证明，碳素钢的 HB 值与其抗拉强度 σ_b 之间存在较好的相关关系，当 $HB<175$ 时，$R_m\approx3.6HB$；当 $HB>175$ 时，$R_m\approx3.5HB$。根据这些关系，可以在钢结构原位上测出钢材的 HB 值来估算钢材的抗拉强度。

7.2.2 钢材的工艺性能

1. 冷弯性能

冷弯性能是指钢材在常温下承受弯曲变形的能力。冷弯是通过检验试件经规定的弯曲程度后，弯曲处外面及侧面有无裂纹、起层、鳞落和断裂等情况进行评定的，其测试方法如图 7.9 所示。一般用弯曲角度以及弯心直径与钢材的厚度或直径的比值来表示。弯曲角度 a 越大，而弯心直径 d 与钢材的厚度或直径的比值越小，表明钢材的冷弯性能越好。

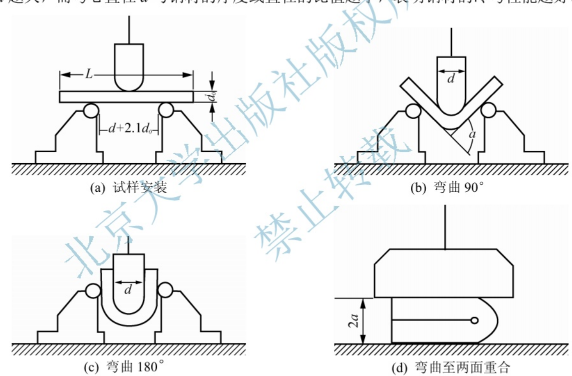


图 7.9 钢筋冷弯

冷弯也是检验钢材塑性的一种方法，并与断后伸长率存在有机联系，断后伸长率大的钢材，其冷弯性能必然好，但冷弯检验对钢材塑性的评定比拉伸试验更严格、更敏感。钢材的冷弯不仅是评定塑性、加工性能的要求，而且也是评定焊接质量的重要指标之一。对于重要结构和弯曲成形的钢材，冷弯必须合格。

2. 可焊性

可焊性是指钢材是否适应通常的焊接方法与工艺的性能。在焊接过程中，高温和焊接后的急剧冷却作用，会使焊缝及附近的过热区发生晶体组织及结构的变化，产生局部变形、内应力和局部硬脆，降低了焊接质量。可焊性好的钢材，易于用一般的焊接方法和工艺施

焊，焊接时不易形成裂纹、气孔、夹渣等缺陷，焊接后，接头强度与母材相近。

钢的可焊性主要与钢的化学成分及其含量有关。当含碳量超过 0.3%时，钢的可焊性变差，特别是硫含量过高时，会使焊接处产生热裂纹并硬脆(热脆性)，其他杂质含量多也会降低钢材的可焊性。

采取焊前预热以及焊后热处理的方法，可使可焊性较差的钢材的焊接质量有所提高。施工中正确选用焊条及正确的操作均能防止夹入焊渣、气孔、裂纹等缺陷，提高其焊接质量。

3. 钢材的成分对性能的影响

钢是含碳量小于 2%的铁碳合金，碳大于 2%时则为铸铁。碳素结构钢由纯铁、碳及杂质元素组成，其中纯铁约占 99%，碳及杂质元素约占 1%。低合金结构钢中，除上述元素外还加入合金元素，其总量通常不超过 3%。除铁、碳外，钢材在冶炼过程中会从原料、燃料中引入一些其他元素。

钢材的成分对性能有着重要的影响，这些成分可分为两类：一类是能改善优化钢材的性能，称为合金元素，主要有 Si、Mn、Ti、V、Nb 等；另一类是能劣化钢材的性能，属钢材的杂质，主要有氧、硫、氮、磷等。化学元素对钢材性能的影响，见表 7-3。

表 7-3　化学元素对钢材性能的影响

化学元素	强　度	硬　度	塑　性	韧　性	可焊性	其　他
碳(C)＜1% ↑	↑	↑	↓	↓	↓	冷脆性↑
硅(Si)＞1% ↑	—	—	↓	↓↓	↓	冷脆性↑
锰(Mn)↑	↑	↑	—	↑	—	脱氧、硫剂
钛(Ti)↑	↑↑	—	↓	↑	—	强脱氧剂
钒(V)↑	↑	—	—	—	—	时效↓
磷(P)↑	↑	—	↓	↓	↓	偏析、冷脆↑↑
氮(N)↑	↑	—	↓	↓↓	↓	冷脆性↑
硫(S)↑	↓	—	—	—	↓	热脆性↑
氧(O)↑	↓	—	—	—	↓	热脆性↑

注：符号“↑”表示上升；“↓”表示下降。



英国皇家邮船泰坦尼克号是当时世界上最大的豪华客轮，被称为是“永不沉没的船”或是“梦幻之船”。1912 年 4 月 10 日，泰坦尼克号从英国南安普敦出发，开始了这艘“梦幻客轮”的处女航。4 月 14 日晚 11 点 40 分，泰坦尼克号在北大西洋撞上冰山，两小时四十分钟后，4

月15日凌晨2点20分沉没，由于缺少足够的救生艇，1 500人葬生海底，造成了当时在和平时期最严重的一次航海事故，也是迄今为止最著名的一次海难。

案例解析：原因一，钢材在低温下会变脆，在极低温度下经不起冲击和振动。钢材的韧性也是随温度的降低而降低的。在某一个温度范围内，钢材会由塑性破坏很快变为脆性破坏。在这一温度范围内，钢材对裂纹的存在很敏感，在受力不大的情况下，便会导致裂纹迅速扩展造成断裂事故。原因二，钢材中所含的化学成分也是导致事故的因素。因为冰山撞击了船体，导致船底的铆钉承受不了撞击因而毁坏，当初制造时也有考虑铆钉的材质使用较脆弱，而在铆钉制造过程中加入了矿渣，但矿渣分布过密，使铆钉变得脆弱而无法承受撞击。泰坦尼克号折成3截后沉没。当时的炼钢技术并不十分成熟，炼出的钢铁在现代的标准根本不能造船。泰坦尼克号上所使用的钢板含有许多化学杂质硫化锌，加上长期浸泡在冰冷的海水中，使得钢板更加脆弱。

7.3 钢材的加工

7.3.1 钢材的冷加工

将钢材于常温下进行冷拉、冷拔、冷压、冷轧使其产生塑性变形，从而提高屈服强度，降低塑性和韧性，这个过程称为冷加工，即钢材的冷加工。

1. 常见冷加工方法

1) 冷拉

将热轧钢筋用冷拉设备进行张拉，拉伸至产生一定的塑性变形后卸去荷载。冷拉参数的控制直接关系到冷拉效果和钢材质量。一般钢筋冷拉仅控制冷拉率，称为单控；对用作预应力的钢筋，须采用双控，既控制冷拉应力又控制冷拉率。冷拉时当拉至控制应力时可以未达控制冷拉率，反之钢筋则应降级使用。钢筋冷拉后，屈服强度可提高 20%～30%，可节约钢材 10%～20%，钢材经冷拉后屈服阶段缩短，伸长率降低，材质变硬。

2) 冷拔

将直径为6.5～8mm的碳素结构钢的Q235(或Q215)盘条，通过拔丝机中钨合金做成的比钢筋直径小0.5～1.0mm的冷拔模孔，冷拔成比原直径小的钢丝，称为冷拔低碳钢丝。如果经过多次冷拔，就可得到规格更小的钢丝。冷拔作用比纯拉伸的作用强烈，钢筋不仅受拉，而且同时受到挤压作用。经过一次或多次冷拔后得到的冷拔低碳钢丝，其屈服点可提高40%～60%，但会失去软钢的塑性和韧性，因而具有硬质钢材的特点。

3) 冷轧

冷轧是将圆钢在轧钢机上轧成断面形状规则的钢筋，可以提高其强度及与混凝土的黏结力。钢筋在冷轧时，纵向与横向同时产生变形，因而能较好地保持其塑性和内部结构的均匀性。

建筑工程中大量使用的钢筋采用冷加工强化，具有明显的经济效益。冷拔钢丝的屈服

点可提高 40%～60%，由此可适当减小钢筋混凝土结构设计截面，或减小混凝土中配筋数量，从而达到节约钢材的目的。

2. 冷加工时效

将钢材于常温下进行冷拉、冷拔或冷轧，使之产生塑性变形，从而提高强度，但钢材的塑性和韧性会降低，这个过程称为冷加工强化处理。冷加工后的钢材，随着时间的延长，钢材的屈服强度、抗拉强度与硬度还会进一步提高，且塑性、韧性继续降低的现象称为时效。时效是一个十分缓慢的过程，有些钢材即使未经过冷加工，长期搁置后也会出现时效，但不如冷加工后表现明显。钢材冷加工后，由于产生塑性变形，使时效大大加快。

钢材冷加工的时效处理有以下两种方法。

(1) 自然时效。将经过冷拉的钢筋在常温下存放 15～20d，称为自然时效。它适用于强度较低的钢材。

(2) 人工时效。对强度较高的钢材，自然时效效果不明显，可将经冷加工的钢材加热到 100～200℃并保持 2～3h，则钢筋强度将进一步提高，这个过程称为人工时效。它适用于强度较高的钢筋。

钢材经时效处理后，其应力与应变关系如图 7.10 所示。

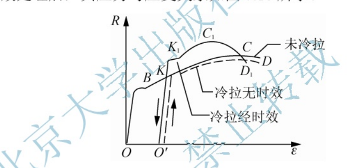


图 7.10 钢筋经冷拉时效后应力-应变图的变化

7.3.2 钢材的热处理

将钢材按一定规则加热、保温和冷却处理以改变其组织，得到所需性能的一种工艺过程，称为钢材的热处理。钢材热处理的方法有以下几种。

1. 退火

退火是将钢材加热到一定温度，保温后缓慢冷却(随炉冷却)的一种热处理工艺，有低温退火和完全退火之分。退火的目的是细化晶粒，改善组织，减少加工中产生的缺陷，减轻晶格畸变，消除内应力，防止变形、开裂。

2. 正火

正火是退火的一种特例。正火在空气中冷却，两者仅冷却速度不同。与退火相比，正火后钢材的硬度、强度较高，而塑性减小。

3. 淬火

淬火是将钢材加热到基本组织转变温度以上(一般为 900℃以上)，保温使组织完全转变，即放入水或油等冷却介质中快速冷却，使之转变为不稳定组织的一种热处理操作。其目的是得到高强度、高硬度的组织。淬火会使钢材的塑性和韧性显著降低。

4. 回火

回火是将钢材加热到基本组织转变温度以下(150～650℃内选定)，保温后在空气中冷却的一种热处理工艺，通常和淬火是两道相连的热处理过程。其目的是促进不稳定组织转变为需要的组织，消除淬火产生的内应力，改善机械性能等。

特别提示

建筑工程所用钢材一般在生产厂家进行热处理并以热处理状态供应。在施工现场，有时需对焊接件进行热处理。

7.4 建筑钢材的标准与选用

7.4.1 建筑常用钢种

1. 普通碳素结构钢

普通碳素结构钢简称碳素钢、碳钢，包括一般结构钢和工程用热轧用型钢、钢板、钢带。

1) 牌号表示方法

根据《碳素结构钢》(GB/T 700—2006)标准，普通碳素结构钢的牌号由代表屈服点的字母(Q)、屈服强度数值(MPa)、质量等级符号(A、B、C、D)、脱氧程度符号(F、B、Z、TZ)这 4 个部分按顺序组成。

屈服强度用符号“Q”表示，有 195MPa、215MPa、235MPa、275MPa 这 4 种；质量等级是按钢中硫、磷含量由多至少划分的，有 A、B、C、D 这 4 个质量等级；按脱氧程度不同分为：沸腾钢(F)、半镇静钢(B)，当为镇静钢或特殊镇静钢时，则牌号表示“Z”与“TZ”符号可予以省略。按标准规定，我国碳素结构钢分 4 个牌号，即 Q195、Q215、Q235 和 Q275。例如 Q235—A·F，它表示：屈服点为 235N/mm^{2}的平炉或氧气转炉冶炼的 A 级沸腾碳素结构钢。

特别提示

普通碳素结构钢质量等级中，品质最佳是 D 级，最差是 A 级。

2) 普通碳素结构钢的技术要求

碳素结构钢的技术要求包括化学成分、力学性能、冶炼方法、交货状态、表面质量等 5 个方面。各牌号碳素结构钢的化学成分及力学性能见表 7-4 和表 7-5，其冷弯性能指标见表 7-6。

表 7-4　碳素结构钢的牌号、等级和化学成分(GB/T 700—2006)

牌号	同一数字代号[①]	等级	厚度(或直径)/mm	脱氧方法	化学成分(质量分数)(%)，不大于				
					C	Si	Mn	P	S
Q195	U11952	—	—	F、Z	0.12	0.30	0.50	0.035	0.050
Q215	U12152	A	—	F、Z	0.15	0.35	1.20	0.045	0.050
	U12155	B							0.045
Q235	U12352	A	—	F、Z	0.22	0.35	1.40	0.045	0.050
	U11952	B			0.20[②]				0.045
	U12358	C		Z	0.17			0.040	0.040
	U12359	D		TZ				0.035	0.035
Q275	U12752	A	—	F、Z	0.24	0.35	1.50	0.045	0.050
	U12755	B	≤40	Z	0.21			0.045	0.045
			＞40		0.22				
	U12758	C	—	Z	0.20			0.040	0.040
	U12759	D		TZ				0.035	0.035

注：①表中为镇静钢、特殊镇静钢牌号的统一数字，沸腾钢牌号的统一数字代号为：Q195F—U11950；Q215AF—U12150，Q215BF—U12153；Q235AF—U12350，Q235BF—U12353；Q275AF—U12353。

②经双方同意，Q235B 的碳含量可不大于 0.22%。

表 7-5　碳素结构钢的拉伸和冲击力学性能(GB/T 700—2006)

牌号	等级	拉伸试验													冲击试验(V 形缺口)	
		屈服强度[①] R_{eH}/(N/mm^2)，不小于						抗拉强度[②] R_m/(N/mm^2)	断后伸长率(%)，不小于					温度/℃	冲击吸收功(纵向)/J，不小于
		厚度(或直径)/mm							厚度(直径)/mm						
		≤16	＞16～40	＞40～60	＞60～100	＞100～150	＞150～200		≤40	＞40～60	＞60～100	＞100～150	＞150～200		
Q195	—	195	185	—	—	—	—	315～430	33	—	—	—	—	—	—
Q215	A	215	205	195	185	175	165	335～450	31	30	29	27	26	—	—
	B													20	27
Q235	A	235	225	215	215	195	185	370～500	26	25	24	23	22	—	—
	B													20	
	C													0	27[③]
	D													−20	

续表

牌号	等级	拉伸试验												冲击试验(V 形缺口)	
		屈服强度[①] R_{eH}/(N/mm^2)，不小于						抗拉强度[②] R_m/(N/mm^2)	断后伸长率/(%)，不小于					温度/℃	冲击吸收功(纵向)/J，不小于
		厚度(或直径)/mm							厚度(直径)/mm						
		≤16	＞16～40	＞40～60	＞60～100	＞100～150	＞150～200		≤40	＞40～60	＞60～100	＞100～150	＞150～200		
Q275	A	275	265	255	245	225	215	410～540	22	21	20	18	17	—	—
	B													20	27
	C													0	
	D													−20	

注：①Q195 的屈服强度值仅供参考，不作交货条件。

②厚度大于 100mm 的钢材，抗拉强度下限允许降低 20N/mm。宽带钢(包括剪切钢板)抗拉强度上限不作交货条件。

③厚度小于 25mm 的 Q235B 级钢材，如供方能保证吸收功值合格，经需方同意，可做检验。

表 7-6　碳素结构钢的冷弯性能指标(GB 700—2006)

牌　　号	试样方向	冷弯试验 180°，$B=2a$[①]	
		钢材厚度(或直径)[②]/mm	
		≤60	＞60～100
		弯心直径 d	
Q195	纵	0	
	横	0.5a	
Q215	纵	0.5a	1.5a
	横	a	2a
Q235	纵	a	2a
	横	1.5a	2.5a
Q275	纵	1.5a	2.5a
	横	2a	3a

注：①B 为试样宽度，a 为钢材厚度(或直径)。

②钢材厚度(或直径)大于 100mm 时，弯曲实验由双方协商确定。

3) 普通碳素结构钢的性能和用途

碳素结构钢的牌号顺序随含碳量的增加逐渐增加，屈服强度和抗拉强度也不断增加，伸长率和冷弯性能则不断下降。碳素结构钢的质量等级取决于钢内有害元素硫(S)和磷(P)的含量，硫、磷含量越低，钢的质量越好，其可焊性和低温抗冲击性能越强。碳素结构钢常用于建筑工程，其性能和用途见表 7-7。

表 7-7 常用碳素钢的性能与用途

牌 号	性 能	用 途
Q195	强度低，塑性、韧性、加工性能与焊接性能较好	主要用于轧制薄板和盘条等
Q215	强度高，塑性、韧性、加工性能与焊接性能较好	大量用做管坯、螺栓等
Q235	强度适中，有良好的承载性，又具有较好的塑性和韧性，可焊性和可加工性也较好，是钢结构常用的牌号	一般用于只承受静荷载作用的钢结构 适用于承受动荷载焊接的普通钢结构 适用于承受动荷载焊接的重要钢结构 适用于低温环境使用的承受动荷载焊接的重要钢结构
Q275	强度高，塑性和韧性稍差，不易冷弯加工，可焊性较差，强度、硬度较高，耐磨性较好，但塑性、冲击韧度和可焊性差	主要用做铆接或拴接结构，以及钢筋混凝土的配筋。不宜在建筑结构中使用，主要用于制造轴类、农具、耐磨零件和垫板等

2. 优质碳素结构钢

按国家标准的规定，优质碳素结构钢根据锰含量的不同可分为普通锰含量钢(锰含量＜0.8%)和较高锰含量钢(锰含量在 0.7%～1.2%)两组。优质碳素结构钢的钢材一般以热轧状态供应，硫、磷等杂质含量比普通碳素钢少，其含量均不得超过 0.035%。其质量稳定，综合性能好，但成本较高。

优质碳素结构钢的牌号用两位数字表示，它表示钢中平均含碳量的万分数，如 45 号钢表示钢中平均含碳量为 0.45%。数字后若有“锰”字或“Mn”，则表示属较高锰含量的钢，否则为普通锰含量钢，如 35Mn 表示平均含碳量为 0.35%，含锰量为 0.7%～1.0%。如是沸腾钢或半镇静钢，还应在牌号后面加“沸”(或 F)或“半”(或 b)。

优质碳素钢的性能主要取决于含碳量。含碳量高，则强度高，但塑性和韧性降低。在建筑工程中，30～45 号钢主要用于重要结构的钢铸件和高强度螺栓等，45 号钢用作预应力混凝土锚具，65～80 号钢用于生产预应力混凝土用的钢丝和钢绞线。

3. 低合金高强度结构钢

低合金高强度结构钢是一种在碳素钢的基础上添加总量小于 5%合金元素的钢材，具有强度高、塑性和低温冲击韧度好、耐锈蚀等特点。低合金高强度结构钢的牌号的表示方法为：屈服强度－质量等级。它以屈服强度划分成 8 个等级，即 Q345、Q390、Q420、Q460、Q500、Q550、Q620、Q690；质量也分为 5 个等级，即 E、D、C、B、A。

《低合金高强度结构钢》(GB/T 1591—2008)规定了各牌号低合金高强度结构钢的化学成分，见表 7-8，力学性能见表 7-9。由于合金元素的强化作用，使低合金结构钢不但具有较高的强度，且具有较好的塑性、韧性和可焊性。低合金高强度结构钢广泛应用于钢结构和钢筋混凝土结构中，特别是大型结构、重型结构、大跨度结构、高层建筑、桥梁工程、承受动力荷载和冲击荷载的结构。

表 7-8　低合金高强度结构钢的牌号及化学成分(GB/T 1591—2008)

牌号	质量等级	化学成分[①②]，%														
		C	Si	Mn	P	S	Nb	V	Ti	Cr	Ni	Cu	N	Mo	B	Als
					不大于											不小于
Q345	A	≤0.20	≤0.50	≤1.70	0.035	0.035	0.07	0.15	0.20	0.30	0.50	0.30	0.012	0.10	—	—
	B				0.035	0.035										
	C				0.030	0.030										0.015
	D	≤0.18			0.030	0.025										
	E				0.025	0.020										
Q390	A	≤0.20	≤0.50	≤1.70	0.035	0.035	0.07	0.20	0.20	0.30	0.50	0.30	0.015	0.10	—	—
	B				0.035	0.035										
	C				0.030	0.030										0.015
	D				0.030	0.025										
	E				0.025	0.020										
Q420	A	≤0.20	≤0.50	≤1.70	0.035	0.035	0.07	0.20	0.20	0.30	0.80	0.30	0.015	0.20	—	—
	B				0.035	0.035										
	C				0.030	0.030										0.015
	D				0.030	0.025										
	E				0.025	0.020										
Q460	C	≤0.20	≤0.50	≤1.80	0.030	0.030	0.11	0.20	0.20	0.30	0.80	0.55	0.015	0.20	0.004	0.015
	D				0.030	0.025										
	E				0.025	0.020										
Q500	C	≤0.18	≤0.60	≤1.80	0.030	0.030	0.11	0.12	0.20	0.60	0.80	0.55	0.015	0.20	0.004	0.015
	D				0.030	0.025										
	E				0.025	0.020										
Q550	C	≤0.18	≤0.60	≤2.00	0.030	0.030	0.11	0.12	0.20	0.80	0.80	0.80	0.015	0.30	0.004	0.015
	D				0.030	0.025										
	E				0.025	0.020										
Q620	C	≤0.18	≤0.60	≤2.00	0.030	0.030	0.11	0.12	0.20	1.00	0.80	0.80	0.015	0.30	0.004	0.015
	D				0.030	0.025										
	E				0.025	0.020										
Q690	C	≤0.18	≤0.60	≤2.00	0.030	0.030	0.11	0.12	0.20	1.00	0.80	0.80	0.015	0.30	0.004	0.015
	D				0.030	0.025										
	E				0.025	0.020										

注：①型材及棒材 P、S 含量可提高 0.000 5%，其中 A 级钢上限可为 0.045%。
②当细化晶粒元素组合加入时，20(Nb + V + Ti)≤0.22%，20(M_o+C_r)≤0.30%。

表 7-9 低合金高强度结构钢的拉伸性能 GB/T 1591—2008)

牌号	质量等级	拉伸试验①②③																						
		以下公称厚度(直径，边长)下屈服强度(R_{el})/MPa									以下公称厚度(直径，边长)下屈服强度(R_m)/MPa								断后伸长率(A)/(%) 公称厚度(直径，边长)					
		≤16mm	>16mm～40mm	>40mm～63mm	>63mm～80mm	>80mm～100mm	>100mm～150mm	>150mm～200mm	>200mm～250mm	>250mm～400mm	≤40mm	>40mm～63mm	>63mm～80mm	>80mm～100mm	>100mm～150mm	>150mm～250mm	>250mm～400mm	≤40mm	>40mm～63mm	>63mm～100mm	>100mm～150mm	>150mm～250mm	>250mm～400mm
Q345	A B C	≥345	≥335	≥325	≥315	≥305	≥285	≥275	≥265	—	470～630	470～630	470～630	470～630	450～600	450～600	—	≥20	≥19	≥19	≥18	≥17	—
	D E									≥265							450～600	≥20	≥21	≥20	≥19	≥18	≥17
Q390	A B C D E	≥390	≥370	≥350	≥330	≥330	≥310	—	—	—	490～650	490～650	490～650	490～650	470～620	—	—	≥20	≥19	≥19	≥18	—	—
Q420	A B C D E	≥420	≥400	≥380	≥360	≥360	≥340	—	—	—	520～680	520～680	520～680	520～680	500～650	—	—	≥19	≥18	≥18	≥18	—	—
Q460	C D E	≥460	≥440	≥420	≥400	≥400	≥380	—	—	—	550～720	550～720	550～720	550～720	530～700	—	—	≥17	≥16	≥16	≥16	—	—
500	C D E	≥500	≥480	≥470	≥450	≥440	—	—	—	—	610～770	600～760	590～750	540～730	—	—	—	≥17	≥17	≥17	—	—	—
Q550	C D E	≥550	≥530	≥520	≥500	≥490	—	—	—	—	670～830	620～810	600～790	590～780	—	—	—	≥16	≥16	≥16	—	—	—
Q620	C D E	≥620	≥600	≥590	≥570	—	—	—	—	—	710～880	690～880	670～860	—	—	—	—	≥15	≥15	≥15	—	—	—
Q690	C D E	≥690	≥670	≥660	≥640	—	—	—	—	—	770～940	750～920	730～900	—	—	—	—	≥14	≥14	≥14	—	—	—

注：①当屈服不明显时，可测量 $R_{p0.2}$ 代替下屈服强度。
②宽度不小于 600mm 扁平材，拉伸试验取横向试样；宽度小于 600mm 的扁平材、型材及棒材取纵向试样，断后伸长率最小值相应提高 1%(绝对值)。
③厚度>250mm～400mm 的数值适用于扁平材。

7.4.2 钢结构用钢

钢结构用钢主要是热轧成形的钢板和型钢等，薄壁轻型钢结构中主要采用薄壁型钢、圆钢和小角钢。钢材所用的母材主要是普通碳素结构钢和低合金高强度结构钢。

1. 热轧型钢

钢结构常用的型钢有：工字钢、H 型钢、T 型钢、槽钢、等边角钢、不等边型钢等，如图 7.11 所示。型钢由于截面形式合理，材料在截面上分布对受力最为有利，且构件间连接方便，所以它是钢结构中采用的主要钢种。型钢的规格通常以反映其断面形状的主要轮廓尺寸来表示。

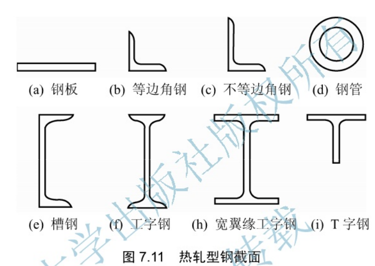


图 7.11 热轧型钢截面

1) 热轧普通工字钢

工字钢是截面为工字型、腿部内侧有 1∶6 斜度的长条钢材。工字钢广泛应用于各种建筑结构和桥梁中，主要用于承受横向弯曲(腹板平面内受弯)的杆件，但不宜单独用作轴心受压构件或双向弯曲的构件。

2) 热轧 H 形钢和 T 形钢

H 形钢由工字钢发展而来，优化了截面的分布。H 形钢截面形状经济合理，力学性能好，常用于要求承载力大、截面稳定性好的大型建筑(如高层建筑)。T 形钢是由 H 形钢对半剖分而成。

3) 热轧普通槽钢

槽钢是截面为凹槽形、腿部内侧有 1∶10 斜度的长条钢材。规格以“腰高度(mm)×腿宽度(mm)×腰厚度(mm)”或“腰高度＃(cm)”表示。槽钢的规格范围为 5＃～40＃。槽钢可用作承受轴向力的杆件、承受横向弯曲的梁以及联系杆件，主要用于建筑钢结构、车辆制造等。

4) 热轧角钢

热轧角钢由两个互相垂直的肢组成，若两肢长度相等，称为等边角钢，若不等则为不等边角钢。角钢的代号为 L，其规格用代号和“长肢宽度(mm)×短肢宽度(mm)×肢厚度(mm)”表示。角钢的规格有 L20×20×3～L200×200×24，L25×16×3～L200×125×18 等。

2. 冷弯薄壁钢板

包括结构用冷弯空心型钢和通用冷弯开口型钢两大类。

3. 棒材、钢管和板材

1) 棒材

常用的棒材有六角钢、八角钢、扁钢、圆钢和方钢。建筑钢结构的螺栓常以热轧六角钢和八角钢为坯材。扁钢在建筑上用作房架构件、扶梯、桥梁和栅栏等。

2) 钢管

钢结构中常用热轧无缝钢管和焊接钢管。钢管在相同截面积下刚度较大，因而是中心受压杆的理想截面；流线型的表面使其承受风压小，用于高耸结构十分有利。在建筑结构上钢管多用于制作桁架、塔桅等构件，也可用于制作钢管混凝土。钢管混凝土是指在钢管内浇筑混凝土而形成的构件，可使构件承载力大大提高，且具有良好的塑性和韧性。钢管混凝土可用于厂房柱、构架柱、地铁站台柱、塔柱和高层建筑等。

3) 板材

钢板材包括钢板、花纹钢板、建筑用压型钢板和彩色涂层钢板等。钢板按轧制方式分为热轧钢板和冷轧钢板。钢板规格表示方法为宽度(mm)×厚度(mm)×长度(mm)。钢板分厚板(厚度＞4mm)和薄板(厚度≤4mm)两种。厚板主要用于结构，薄板主要用于屋面板、楼板和墙板等。在钢结构中，单块钢板不能独立工作，必须用几块板组合成工字形、箱形等结构来承受荷。

知识链接

北京奥运会主体育场——国家体育场“鸟巢”是目前国内外体育场馆中用钢量最多、规模最大、施工难度特别大的工程之一。尤其是巢结构受力最大的柱脚部位，母材的质量、焊接质量的高低直接影响到整个工程的安全性。为了能够有效地支撑整体结构，设计中采用了高强度的 Q460 钢材，但此种钢材此前一直依靠国外进口，国内在建筑领域从未使用过，可是如果依赖进口，不仅价格贵而且进货周期长，无法保证工程的正常进行。于是，工程技术人员和河南舞阳特种钢厂的科研人员共同努力，最终用国产的 Q460 撑起了“鸟巢”的铁骨钢筋。

整个体育场建筑呈椭圆的马鞍形，体育场内部为上、中、下三层碗状看台，观众座席下有 5～7 层混凝土框架结构。如何将“鸟巢”按主次结构编制起来，在设计理论方面已是个突破。此外设计时，这个时代的各种计算软件都不能满足鸟巢这个工程的需要。因此，承建方甚至自己针对问题研制开发出一些软件，才满足了鸟巢的计算工作。作为北京奥运会的主体育场，“鸟巢”可容纳近 10 万人，如此大的容量自然也对其纵切面门架的跨度要求非常高，按照设计，“鸟巢”的钢结构屋盖呈双曲面马鞍形，是目前世界最大跨度钢结构工程。用一般的钢材很难完成，经过多方筛选后，Q460E 型钢材最终荣幸地承担起了搭建“鸟巢”的职责。Q460E 钢材是国内钢厂为了“鸟巢”专门研制的，在国家标准中，Q460 系列的钢最大厚度只是 100mm，但根据实际情况所需，“鸟巢”使用的钢板厚度史无前例地达到 110mm。据施工方技术人员介绍，鸟巢肩部弯度建起来以后，受力是最复杂的部位，如果不用 Q460E 这种高强度、高性能的钢，而采用别的钢，可能会更浪费，甚至可能会引起其他方面的问题。作为世界最大的钢结构工程，“鸟巢”外部钢结构的钢材用量为 4.2 万吨，整个工程包括混凝土中的钢材、螺纹钢等，总用钢量达到了 11 万吨，全部为国产钢。



7.4.3 混凝土结构用钢

混凝土具有较高的抗压强度，但抗拉强度很低。用钢筋增强混凝土，可大大扩展混凝土的应用范围，而混凝土又对钢筋起保护作用。钢筋混凝土结构的钢筋，主要由碳素结构钢和低合金高强度结构钢加工而成。钢筋直径一般都相差 2mm 及 2mm 以上。一般把直径 3～5mm 的称为钢丝，直径 6～12mm 的称为细钢筋，直径大于 12mm 的称为粗钢筋。主要品种有热轧钢筋、热处理钢筋、冷拉钢筋、冷轧带肋钢筋、冷轧扭钢筋、冷拔低碳钢丝及钢绞线等。

1. 热轧钢筋

热轧钢筋按轧制的外形分为热轧光圆钢筋和热轧带肋钢筋。

1) 热轧光圆钢筋

热轧光圆钢筋是经热轧成型，横截面通常为圆形，表面光滑的成品钢筋。《钢筋混凝土用钢　第 1 部分：热轧光圆钢筋》(GB 1499.1—2008)规定，热轧光圆钢筋公称直径范围为 6～22mm，推荐钢筋直径为 6mm、8mm、10mm、12mm、16mm、20mm。热轧光圆钢筋按屈服强度特征值分为 HPB235、HPB300 级，钢筋牌号的构成和含义见表 7-10。

表 7-10　热轧光圆钢筋牌号的构成和含义

产品名称	牌号	牌号组成	英文字母含义	光圆钢筋的截面形状 (*d* 为钢筋直径)
热轧光圆钢筋	HPB235	由 HPB+屈服强度特征值构成	HPB—热轧光圆钢筋 (Hot Rolled Plain Bars)	*d*
	HPB300			

热轧光圆钢筋化学成分(熔炼分析)、力学性能及工艺性能见表 7-11。

表 7-11　热轧光圆钢筋的化学成分、力学性能及工艺应性能(GB 1499.1—2008)

牌号	化学成分(质量分数)(%)，≥					R_{eL}/MPa	R_m/MPa	A/(%)	A_{gt}/(%)	冷弯实验 180°，d=弯芯直径，a=钢筋公称直径
	C	Si	Mn	P	S	≥				
HPB235	0.22	0.30	0.65	0.045	0.050	235	370	25.0	10.0	$d=a$
HPB300	0.25	0.55	1.50			300	420			

2) 热轧带肋钢筋

根据《钢筋混凝土用钢　第 2 部分：热轧带肋钢筋》(GB 1499.2—2007)规定，热轧钢筋分普通热轧钢筋和热轧后带有控制冷却并自回火处理带肋钢筋。按屈服强度特征值分为 HRB335、HRB400、HRB500 级。钢筋的牌号构成及含义见表 7-12。热轧带肋钢筋的化学成分见表 7-13。普通热轧带肋钢筋的相关力学指标要求见表 7-14。按表 7-15 规定的弯芯直径弯曲 180º 后，钢筋受弯曲部位表面不得产生裂纹。

表 7-12　热轧带肋钢筋牌号的构成及含义(GB 1499.2—2007)

类　别	牌　号	牌号构成	英文字母含义
普通热轧钢筋	HRB335 HRB400 HRB500	由 HRB+屈服强度特征值构成	HRB——热轧带肋钢筋的英文(Hot Rolled Ribbed Bars)的缩写
细晶粒热轧钢筋	HRBF335 HRBF400 HRBF500	由 HRBF+屈服强度特征值构成	HRBF——在热轧带肋钢筋的英文缩写后加“细”的英文(Fine)首位字母

表 7-13　热轧带肋钢筋化学成分(GB 1499.2—2007)

牌号	化学成分(质量分数)(%)，≤					
	C	Si	Mn	P	S	Ceq
HRB335 HRBF335						0.52
HRB400 HRBF400	0.25	0.80	1.60	0.045	0.045	0.54
HRB500 HRBF500						0.55

表 7-14　钢筋混凝土用热轧带肋钢筋的力学性能(GB 1499.2—2007)

牌号	R_{eL}/ MPa	R_m/MPa	A(%)	A_{gt}(%)
HRB335 HRBF335	335 400	455 540	17	
HRB400 HRBF400	500 335	630 390	16	≥7.5
HRB500 HRBF500	400 500	460 575	15	

注：R_{eL} 是钢筋的屈服强度特征值；R_m 是钢筋的抗拉强度特征值；A 是钢筋的伸长率；A_{gt} 是钢筋在最大力下的总伸长率。

表 7-15　钢筋混凝土用热轧带肋钢筋的工艺性能(GB 1499.2—2007)

牌　号	公称直径 d	弯芯直径
	6～25	$3d$
HRB335 HRBF335	28～40	$4d$
	＞40～50	$5d$



续表

牌　号	公称直径 *d*	弯芯直径
HRB400 HRBF400	6～25	4*d*
	28～40	5*d*
	＞40～50	6*d*
HRB500 HRBF500	6～25	6*d*
	28～40	7*d*
	＞40～50	8*d*

按照 GB 1499.2—2007 规定，热轧带肋钢筋在进行交货检验时的检验项目包括：①尺寸、外形、重量及允许偏差检验；②表面质量检验；③拉伸性能检验；④冷弯性能检验；⑤反复弯曲性能检验；⑥化学成分检验；⑦供需双方经协议，也可进行疲劳试验。

热轧带肋钢筋在进行进场检验时的常规检验项目主要包括以上前四项的检验内容。

热轧带肋抗震钢筋(标记符号为在热轧带肋牌号后加 E，如 HRB400E)力学指标除满足表 7-14 规定外，还应满足：实测抗拉强度与实测屈服强度之比应不小于 1.25；实测屈服强度与表 7-14 规定的屈服强度特征值之比不大于 1.3；钢筋最大力下总伸长率不小于 9%。

特别提示

根据 GB 1499.2—2007 规定，钢筋的标志就是热轧带肋钢筋在生产时轧制的标志符号。钢筋牌号以阿拉伯数字加英文字母表示，如 HRB335、HRB400、HRB500 分别以 3、4、5 表示，RRB335、RRB400、RRB500 分别以 C3、C4、C5 表示。厂名以汉语拼音字头表示，直径毫米数以阿拉伯数字表示。牌号 HRB335E，HRB400E 的抗震钢筋，应另在包装及质量证明书上明示。

2. 冷轧带肋钢筋

冷轧带肋钢筋是用热轧盘条经冷轧后，在其表面带有延长度方向均匀分布的三面或两面横肋的钢筋。冷轧带肋钢筋的牌号由 CRB 和钢筋的抗拉强度最小值构成。冷扎带肋钢筋分为 CRB550、CRB650、CRB800、CRB970 四个牌号。CRB550 钢筋的公称直径范围为 4～12mm。CRB650 及以上牌号钢筋的公称直径为 4mm、5mm、6mm。钢筋的力学性能和工艺性能应符合表 7-16 的规定。当进行弯曲试验时，受弯曲部位表面不得产生裂纹。反复弯曲试验的弯曲半径应符合表 7-17 的规定。

表 7-16　冷拉带肋钢筋力学、工艺性能(GB 13788—2008)

牌号	$R_{p0.2}$ /MPa ≥	R_m /MPa ≥	伸长率(%)，≥		弯曲试验 180°	反复弯曲次数	应力松弛 初始应力相当于公称抗拉强度的 70%
			$A_{11.3}$	A_{100}			1 000h 松弛率(%)，≤
CRB550	500	550	8.0	—	*D*=3*d*	—	—
CRB650	585	650	—	4.0	—	3	8

续表

牌号	$R_{p0.2}$ /MPa ≥	R_m /MPa ≥	伸长率(%)，≥		弯曲试验 180°	反复弯曲次数	应力松弛 初始应力相当于公称抗拉强度的 70%
			$A_{11.3}$	A_{100}			1 000h 松弛率(%)，≤
CRB800	720	800	—	4.0	—	3	8
CRB970	875	970	—	4.0	—	3	8

注：表中 *D* 为弯心直径，*d* 为钢筋公称直径。

表 7-17　反复弯曲试验的弯曲半径

单位：mm

钢筋公称直径	4	5	6
弯曲半径	10	15	15

注：(1)钢筋的屈强比 $R_m / R_{p0.2}$ 比值应不小于 1.03，经供需双方协议可用 A_{gt} ≥2.0%代替 *A* 。

(2)供方在保证 1 000h 松弛率合格基础上，允许使用推算法确定 1 000h 松弛。

冷轧带肋钢筋与冷拔低碳钢丝相比，冷轧带肋钢筋具有强度高、塑性好、质量稳定、与混凝土黏结牢固等优点，是一种新型的建筑用钢材。CRB550 为普通钢筋混凝土用钢筋，其他牌号为预应力混凝土用钢筋。

3. 冷拔低碳钢丝

指采用 6.5mm 及 8mm 的碳素结构钢盘条，在常温下经冷拔而制成的 3mm、4mm、5mm 的圆截面的钢丝。用于小型预应力构件焊接或绑扎骨架、网片或箍筋。

4. 预应力钢丝、刻痕钢丝、钢绞线

预应力钢丝以优质高碳钢盘条经等温淬火拔制而成，直径为 2.5～5mm，抗拉强度为 1 500～1 900MPa。

为增加与混凝土的黏结力，若将预应力钢丝经辊压压出规律性的凹痕，即成为刻痕钢筋。为满足后张法预应力混凝土施工，有多根高强度钢丝捻制在一起经过低温回火处理消除内应力后而制成钢绞线，分为 1×2、1×3、1×7 三种，以适应不同的钢筋混凝土工程。

预应力钢丝和钢绞线强度高，并具有较好的柔韧性，质量稳定，施工简便，使用时可根据要求的长度切断，主要适用于大荷载、大跨度、曲线配筋的预应力钢筋混凝土结构。

7.4.4 钢材的选用原则

钢材的选用一般遵循下列原则。

1. 荷载性质

对于经常承受动力和振动荷载的结构，容易产生应力集中，从而引起疲劳破坏，需要选用材质高的钢材。

2. 使用温度

对于经常处于低温状态的结构，钢材容易发生冷脆断裂，特别是焊接结构，冷脆倾向更加显著，因而要求钢材具有良好的塑形和低温冲击韧性。

3. 连接方式

焊接结构当温度变化和受力性质改变时，易导致焊缝附近的母材金属出现冷、热裂纹，促进结构早期破坏，所以，焊接结构对钢材的化学成分和机械性能要求更应严格。

4. 钢材厚度

钢材力学性能一般随厚度增大而降低，钢材经多次轧制后，钢内部结晶组织更为紧密，强度更高，质量更好。故一般结构的钢材厚度不宜超过 40mm。

5. 结构重要性

选择钢材要考虑结构使用的重要性，如大跨度和重要的建筑物，需相应选择质量更好的钢材。

7.5 钢材的防锈与防火

7.5.1 建筑钢材的锈蚀与防护

1. 钢材锈蚀的机理

钢材的锈蚀是指钢材表面与周围介质发生作用而引起破坏的现象。根据钢材与环境介质作用的机理，锈蚀可分为化学锈蚀和电化学锈蚀。

1) 化学锈蚀

化学锈蚀是指钢材与周围介质(如氧气、二氧化碳、二氧化硫和水等)发生化学反应，生成疏松的氧化物而产生的锈蚀。一般情况下，是钢材表面 FeO 保护膜被氧化成黑色的 Fe_3O_4。在常温下，钢材表面能形成 FeO 保护膜，可以防止钢材进一步锈蚀。在干燥环境中化学锈蚀速度缓慢，但当温度和湿度较大时，这种锈蚀速度会加快。

2) 电化学锈蚀

电化学锈蚀是指钢材与电解溶液接触而产生电流，形成原电池而引起的锈蚀。电化学锈蚀是建筑钢材在存放和使用中发生锈蚀的主要形式。

2. 钢筋混凝土中的钢筋锈蚀

普通混凝土为强碱性环境，使之对埋入其中的钢筋形成碱性保护。在碱性环境中，阴极过程难以进行。即使有原电池反应存在，生成的 $Fe(OH)_2$ 也能稳定存在，并成为钢筋的保护膜。所以，用普通混凝土制作的钢筋混凝土，只要混凝土表面没有缺陷，里面的钢筋是不会锈蚀的。但是，普通混凝土制作的钢筋混凝土有时也发生钢筋锈蚀现象。

3. 钢材锈蚀的防止

1) 表面刷漆

表面刷漆是钢结构防止锈蚀的常用方法。刷漆通常有底漆、中间漆和面漆三道。底漆要求有较好的附着力和防锈能力，常用的有红丹、环氧富锌漆、云母氧化铁和铁红环氧底漆等。

2) 表面镀金属

用耐腐蚀性好的金属，以电镀或喷镀的方法覆盖在钢材的表面，提高钢材的耐腐蚀能力。常用的方法有镀锌(如白铁皮)、镀锡(如马口铁)、镀铜和镀铬等。

3) 采用耐候钢

耐候钢是在碳素钢和低合金钢中加入少量的铜、铬、镍、钼等合金元素而制成的。耐候钢既有致密的表面防腐保护，又有良好的焊接性能，其强度级别与常用碳素钢和低合金钢一致，且技术指标相近。

7.5.2 钢材的防火

钢是不燃性材料，但这并不表明钢材能够抵抗火灾。无保护层时钢柱和钢屋架的耐火极限只有 15 min，而裸露 Q235 钢梁的耐火极限仅为 27min。温度在 200℃以内，可以认为钢材的性能基本不变；当温度超过 300℃以后，钢材的弹性模量、屈服点和极限强度均开始显著下降，而塑性伸长率急剧增大，钢材产生徐变；温度超过 400℃时，强度和弹性模量都急剧降低；温度到达 600℃时，弹性模量、屈服点和极限强度均接近于零，已失去承载能力。所以，没有防火保护层的钢结构是不耐火的。

钢结构防火保护的基本原理是采用绝热或吸热材料，阻隔火焰和热量，推迟钢结构的升温速率。防火方法以包覆法为主，即以防火涂料、不燃性板材或混凝土和砂浆将钢构件包裹起来。

1) 防火涂料包裹法

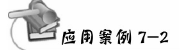
此方法是采用防火涂料，紧贴钢结构的外露表面，将钢构件包裹起来，是目前最为流行的做法。

2) 不燃性板材包裹法

常用的不燃性板材有防火板、石膏板、硅酸钙板、蛭石板、珍珠岩板和矿棉板等，可通过黏结剂或钢钉、钢箍等固定在钢构件上，将其包裹起来。

3) 实心包裹法

一般做法是将钢结构浇注在混凝土中。



纽约世界贸易中心大楼位于曼哈顿闹市区南端，雄踞纽约海港旁，是美国纽约市最高、楼层最多的摩天大楼。大楼于 1966 年开工，历时 7 年，1973 年竣工以后，以 411m 的高度作为 110 层的摩天巨人而载入史册。它是由 5 幢建筑物组成的综合体。其主楼呈双塔形，塔柱边宽 63.5m。大楼采用钢结构，用钢 78 000t，楼的外围有密置的钢柱，墙面由铝板和玻璃窗组成，

素有“世界之窗”之称。2001年9月11日，“基地”恐怖分子劫持客机撞向美国世贸大楼，导致纽约标志性建筑世贸双塔轰然倒塌。

英国科学家表示，世贸双塔之所以倒塌，主要是因为建塔的钢铁在高温燃烧下其磁性发生了变化，进而软化发生倒塌。在室温下，铁原子之间的磁场仍然保持相对稳定。但是，随着温度的升高，这些磁场不断发生不规则改变，原子之间的运动和碰撞加速，这种变化导致了钢的性能变化。千百年来铁匠一直在利用钢铁的这种性能来谋生。在比熔点低得多的温度下，钢铁开始变得柔软易折，铁匠可以将其打造成任何形状。从大约500℃时钢铁就已经开始变软，而一般的建筑物大火则经常可以达到这种温度。在9·11恐怖袭击事件中，纽约世贸中心双塔被劫持的飞机撞击后，其钢架构表面的保护层绝缘面板随之脱落。双塔的钢架构因此完全暴露于大火之中，当时大火的温度已接近500℃的钢软化点。

7.6 建筑钢材的验收与储运

1. 钢材的验收

钢材的验收按批次检查验收。钢材验收的主要内容如下。

(1) 钢材的数量和品种是否与订货单符合。

(2) 钢材表面质量的检验。钢材表面不允许有结疤、裂纹、折叠和分层、油污等缺陷。

(3) 钢材的质量保证书是否与钢材上打印的记号相符合。每批钢材必须具备生产厂家提供的材质证明书，写明钢材的炉号、钢号、化学成分和机械性能等，根据国家技术标准核对钢材的各项指标。

(4) 根据国家标准按批次抽取试样检测钢材的力学性能。同一级别、种类，同一规格、批号、批次不大于60t为一检验批(不足60t也为一检验批)，取样方法应符合国家标准规定。

2. 钢材的储运

1) 运输

钢材在运输中要求不同钢号、炉号、规格的钢材分别装卸，以免混乱。装卸中钢材不许摔掷，以免破坏。在运输过程中，其一端不能悬空及伸出车身的外边。另外，装车时要注意荷重限制，不许超过规定，并须注意装载负荷的均衡。

2) 堆放

钢材的堆放要减少钢材的变形和锈蚀，节约用地，且便于提取钢材。

(1) 钢材应按不同的钢号、炉号、规格、长度等分别堆放。

(2) 堆放在有顶棚的仓库时，可直接堆放在草坪上(下垫楞木)，对小钢材也可放在架子上，堆与堆之间应留出走道；堆放时每隔5～6层放置楞木。其间距以不引起钢材明显的弯曲变形为宜。楞木要上下对齐，并在同一垂直平面内。

(3) 露天堆放时，应加上简易的篷盖，或选择较高的堆放场地，四周有排水沟。堆放时尽量使钢材截面的背面向上或向外，以免积雪、积水。

(4) 为增加堆放钢材的稳定性，可使钢材互相勾连，或采用其他措施。标牌应标明钢材的规格、钢号、数量和材质验收证明书号，并在钢材端部根据其钢号涂以不同颜色的油漆。

(5) 钢材的标牌应定期检查。选用钢材时，要按顺序寻找，不准乱翻。

(6) 完整的钢材与已有锈蚀的钢材应分别堆放。凡是已经锈蚀的钢材，应捡出另放，并进行适当的处理。

本任务小结

钢材是建筑工程中最重要的材料之一。

钢材具有强度高、塑性及韧性好、可焊可铆、易于加工、便于装配等优点，被广泛应用于工业各领域。

建筑钢材的技术性能主要包括力学性能和工艺性能。力学性能有抗拉冲击韧性、疲劳强度和硬度等；工艺性能有钢材冷弯、冷加工及时效处理和钢材的焊接。低碳钢的拉伸破坏过程分为弹性、屈服、强化和缩颈 4 个阶段。延伸率和冷弯性是衡量钢材塑性的指标，钢材通过冷加工时效处理，可提高钢材的强度，但塑性和韧性下降。

建筑用钢材可分为结构用型钢和钢筋混凝土用钢筋、钢丝。钢结构用钢材包括碳素结构钢、低合金高强度结构钢和各种类型的型钢等；钢筋混凝土用钢材包括热轧钢筋、预应力混凝土用热处理钢筋、冷轧带肋钢筋、预应力混凝土用钢丝和钢绞线等。在工程实践中，应根据荷载性质、结构重要性、使用环境等因素合理选用钢材规格和品种。

钢材最大的缺点是易生锈和耐高温性能不佳，要根据环境特点合理选择钢材的防锈和防火措施。

钢材验收与储运应严格按照相应标准要求执行。

习题

一、填空题

1．结构设计时，软钢以__________作为设计计算取值的依据。

2．牌号为 Q235—B.b 的钢，其性能__________于牌号为 Q235—A.F 的钢。

3．钢中磷的主要危害是__________，硫的主要危害是__________。

4．建筑工地和混凝土构件厂，常利用冷拉、冷拔及时效处理的方法，达到提高钢材的__________，降低__________和__________钢材的目的。

5．含硫的钢材在焊接时易产生__________。

6．与 Q235—A・Z 比较，Q235—C・Z 的杂质含量__________。

7. 低碳钢的受拉破坏过程，可分为__________、__________、__________和__________4 个阶段。

8．建筑工程中常用的钢种是__________和__________。

9．普通碳素钢分为__________个牌号，随着牌号的增大，其__________和__________提高，其__________、__________降低。

二、选择题

1．普通碳素钢按屈服点、质量等级及脱氧方法划分为若干个牌号。随牌号提高，钢材(　　)。

A．强度提高，伸长率提高　　B．强度降低，伸长率降低

C．强度提高，伸长率降低　　D．强度降低，伸长率提高

2．热轧钢筋级别提高，则其(　　)。

A．R_{el}、R_m 提高　　B．R_{el} 与 R_m 提高，A 下降

C．A 提高，R_m 下降　　D．R_{el}、R_m 及冷弯性能

3．提高含(　　)高的钢材，产生热脆性。

A．硫　　B．磷　　C．氧　　D．氮

4．建筑中主要应用的是(　　)。

A．Q195　　B．Q215d　　C．Q235　　D．Q275

5．钢材随时间延长而表现出强度提高，塑性和冲击韧度下降，这种现象称为(　　)。

A．钢的强化　　B．时效

C．时效敏感性　　D．钢的冷脆

三、简答题

1．钢号为 15MnV 和 45Si2MnTi 的钢属何种钢？钢号的含义是什么？

2．钢材的冷加工强化有何作用和意义？

3．简述钢材的化学成分对钢材性能的影响。

4．为什么屈服强度、抗拉强度和断后伸长率是建筑用钢材的重要技术性能指标？

四、案例题

1．某一钢材试件，直径为 25mm，原标距为 125mm，做拉伸试验，当屈服点荷载为 201.0kN 时，达到最大荷载为 250.3kN，拉断后测得的标距长为 138mm。试求该钢筋的屈服强度、抗拉强度及断后伸长率。

2．某建筑工地有一批热轧钢筋，其标签上牌号字迹模糊，为了确定其牌号，截取两根钢筋做拉伸试验，测得结果如下：屈服点荷载分别为 33.0kN、32.0kN；抗拉极限荷载分别为 61.0kN、60.5KN。钢筋实测直径为 12mm，标距为 60mm，拉断后长度分别为 72.0mm、74mm。试计算该钢筋的屈服强度、抗拉强度及伸长率，并判断这批钢筋的牌号。

学习任务 8

建筑功能材料

学习目标

通过对防水材料、绝热材料、吸声与隔声材料、建筑塑料和常见建筑装饰材料的学习，了解石油沥青的组分；掌握石油沥青及典型防水卷材的主要技术性质、分类标准和选用；了解绝热材料、吸声材料和隔声材料的概念、主要性能指标、材料特性及主要用途；了解塑料的组成与种类，掌握典型建筑塑料的特性与应用；了解各类装饰材料的组成，掌握它们的性质与应用。

学习要求

能力目标	知识要点	权重
掌握石油沥青的技术性质	沥青的黏性、塑性、温度敏感性等	10%
了解石油沥青的改性	改性石油沥青的特点	5%
掌握防水卷材的品种、性能及应用	SBS、APP、三元乙丙橡胶防水卷材等典型品种	15%
了解常见的防水涂料	常见防水涂料的名称和特点	5%
熟悉防水材料的选用	根据工程的特点不同进行选用	5%
了解导热系数和常见绝热材料	导热系数，常见的绝热材料	15%
了解吸声系数，吸声材料和隔声材料的区别	吸声系数，吸声材料和隔声材料的特点	5%
了解塑料的概念、种类及应用	各类建筑塑料的特性与应用	15%
了解陶瓷类材料的种类及应用	各陶瓷类材料的特性与应用	5%
掌握天然与人造石材的种类及应用	大理石与花岗石、人造石材的特性及应用	5%
了解金属类装饰材料的种类、特性及应用	铝和铝合金、不锈钢等材料的特性及应用	5%
了解建筑玻璃的种类、特性及应用	装饰型、安全型、节能型玻璃特性及应用	5%
了解建筑装饰涂料的种类、特性及应用	各类装饰涂料的特性及应用	5%

任 务 导 读

建筑功能材料主要是指担负某些功能的非承重材料，如防水材料、隔声吸声材料、绝热材料、装饰材料等(图 8.1)，建筑功能材料为人类居住生活提供了更优质的服务。

近年来，建筑功能材料发展迅速，且在三方面有较大的发展：一是注重环境协调性，注重健康、环保；二是复合多功能；三是智能化。

(a) 防水卷材

(b) 土工膜防水卷材

(c) 隔声材料

(d) 金字塔型吸声材料

(e) 摩天大厦中的玻璃幕墙

图 8.1　建筑功能材料图例



玻璃的发展历史

玻璃最初由火山喷出的酸性岩凝固而得。约公元前3700年前，古埃及人已制出玻璃装饰品和简单玻璃器皿，当时只有有色玻璃；约公元前1000年前，中国制造出了无色玻璃。12世纪，就出现了商品玻璃，并开始成为工业材料；18世纪，为适应研制望远镜的需要，制出光学玻璃；1873年，比利时首先制出平板玻璃；1906年，美国制出平板玻璃引上机。此后，随着玻璃生产的工业化和规模化，各种用途和各种性能的玻璃相继问世。在现代，玻璃已成为日常生活、生产和科学技术领域的重要材料。

3 000多年前，一艘欧洲腓尼基人的商船，满载着晶体矿物“天然苏打”，航行在地中海沿岸的贝鲁斯河上。由于海水落潮，商船搁浅了。于是船员们纷纷登上沙滩，有的船员还抬来大锅，搬来木柴，并用几块“天然苏打”作为大锅的支架，在沙滩上做起饭来。船员们吃完饭，潮水开始上涨了。他们正准备收拾一下登船继续航行时，突然有人高喊：“大家快来看啊，锅下面的沙地上有一些晶莹明亮、闪闪发光的东西!”船员们把这些闪烁光芒的东西，带到船上仔细研究起来。他们发现，这些亮晶晶的东西上黏有一些石英砂和融化的“天然苏打”。原来，这些闪光的东西是他们做饭时用作锅的支架的“天然苏打”，在火焰的作用下，与沙滩上的石英砂发生化学反应而产生的晶体，这就是最早的玻璃。后来腓尼基人把石英砂和“天然苏打”和在一起，然后用一种特制的炉子熔化，制成玻璃球，使腓尼基人发了一笔大财。

4世纪，罗马人开始把玻璃应用在门窗上。直到1291年，意大利的玻璃制造技术已经非常发达。1688年，一个名叫纳夫的人发明了制作大块玻璃的工艺，从此，玻璃成了普通的物品。

人们现在使用的玻璃是由石英砂、纯碱、长石及石灰石经高温制成的。

熔体在冷却过程中黏度逐渐增大而得利的不结晶的固体材料，性脆而透明，有石英玻璃、硅酸盐玻璃、钠钙玻璃、氟化物玻璃等。通常所指的硅酸盐玻璃是以石英砂、纯碱、长石及石灰石等为原料，经混合、高温熔融、匀化后，加工成形，再经退火而得的。广泛用于建筑、日用、医疗、化学、电子、仪表、核工程等领域。

8.1 防水材料



看看以下现象，并分析原因。

(1) 河北中部地区每到冬天的时候，附近的沥青路面总会出现一些裂缝，裂缝大多是横向的，且几乎为等间距的。

(2) 某住宅楼面于8月份施工，铺贴沥青防水卷材全是白天施工，之后卷材出现鼓化、渗漏的现身。

(3) 某石砌水池因砂缝不饱满，之后以一种水泥基粉状刚性防水涂料整体涂履，效果良好，长时间不渗透。但同样使用此防水涂料用于一因基础下陷不均而开裂的地下室防水，效果却不佳。

8.1.1 石油沥青

沥青是一种有机胶凝材料，它是复杂的大分子碳氢化合物及非金属(氧、硫、氮等)衍生物的混合物。在常温下为黑色或黑褐色液体、固体或半固体，具有明显的树脂特性，能溶于二硫化碳、四氯化碳、苯及其他有机溶剂。沥青与许多材料表面都有良好的黏结力，它不仅能黏附于矿物材料表面，而且能黏附在木材、钢铁等材料表面；沥青是一种憎水性材料，几乎不溶于水，而且构造密实，是建筑工程中应用最广泛的一种防水材料；沥青能抵抗一般酸、碱、盐等侵蚀性液体和气体的侵蚀，故广泛应用于防水、防潮、防腐材料。

石油沥青是由石油原油经蒸馏等炼制工艺提炼出各种轻质油(汽油、煤油、柴油等)和润滑油后的残余物，经再加工后的产物。石油沥青的化学成分很复杂，很难把其中的化合物逐个分离出来，且化学组成与技术性质间没有直接的关系，因此，为了便于研究，通常将其中的化合物按化学成分和物理性质是否比较接近，划分为若干组分(又称组丛)。这些组分包括：油分，占约 40%～60%，含量越高，沥青的软化点越低，沥青流动性越大，但温度稳定性差；树脂，占约 15%～30%，使石油沥青具有良好的塑性和黏结性；地沥青质，占约 10%～30%，是决定石油沥青热稳定性和黏性的重要组分，含量越多，软化点越高，也越硬、脆。石油沥青的性质与各组分之间的比例密切相关。液体沥青中油分、树脂多质，流动性好；而固体沥青中树脂、地沥青质多，特别是地沥青多，所以热稳定性和黏结性好。

特别提示

石油沥青中往往还含有一定量的固体石蜡，它是沥青中的有害物质，会使沥青的黏结性、塑性、耐热性和稳定性变坏。

石油沥青中这几个组分的比例并不是固定不变的，在热、阳光、空气和水等外界因素的作用下，组分在不断改变，即由油分向树脂、树脂向地沥青质转变，油分、树脂逐渐减少，而地沥青质逐渐增多，使沥青流动性、塑性逐渐变小，脆性增加直至脆裂。这种现象称为沥青材料的老化。

1. 石油沥青的主要技术性质

1) 黏滞性

黏滞性是指石油沥青在外力作用下抵抗变形的性能。黏滞性的大小，反映了胶团之间吸引力的大小，即反映了胶体结构的致密程度。当地沥青质含量较高，有适量树脂，但油分含量较少时，黏滞性较大。在一定温度范围内，当温度升高时，黏滞性随之降低，反之则增大。

表征液体沥青黏滞性的指标是黏滞度，如图 8.2 所示。表征半固体沥青、固体沥青黏滞性的指标是针入度，如图 8.3 所示。

2) 塑性

塑性是指石油沥青在外力作用时产生变形而不破坏的性能，沥青之所以能被制成性能

良好的柔性防水材料，在很大程度上取决于这种性质。石油沥青中树脂含量大，其他组分含量适当，则塑性较高。温度及沥青膜层厚度也影响塑性，温度升高，则塑性增大；膜层增厚，则塑性也增大。在常温下，沥青的塑性较好，对振动和冲击作用有一定承受能力，因此常将沥青铺作路面。

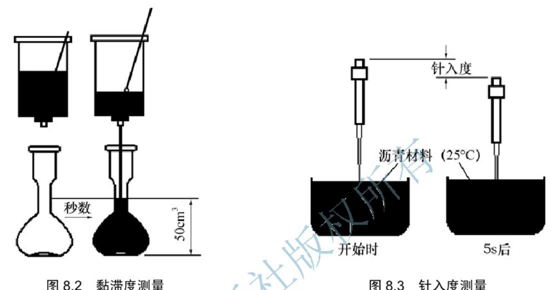


图 8.2　黏滞度测量　　　　图 8.3　针入度测量

沥青的塑性用延度(延伸度)表示，如图 8.4 所示。

3) 温度敏感性(温度稳定性)

温度敏感性是指石油沥青的黏滞性和塑性随温度升降而变化的性质。温度敏感性越大，则沥青的温度稳定性越低。温度敏感性大的沥青，在温度降低时很快变成脆硬的物体，受外力作用极易产生裂缝以致破坏；而当温度升高时即成为液体流淌，而失去防水能力。因此，温度敏感性是评价沥青质量的重要性质。

沥青的温度敏感性通常用“软化点”表示。软化点是指沥青材料由固体状态转变为具有一定流动性膏体的温度。软化点可通过“环球法”试验测定，如图 8.5 所示。

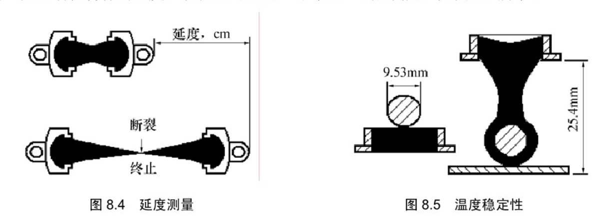


图 8.4　延度测量　　　　图 8.5　温度稳定性

特别提示

不同的沥青软化点不同，大致在 25～100℃。软化点高，说明沥青的耐热性好，但软化点过高，又不易加工；软化点低的沥青，夏季易产生变形，甚至流淌。所以，在实际应用中，总希望沥青具有高软化点和低脆化点(当温度在非常低的范围时，整个沥青就好像玻璃一样脆硬，

一般称为“玻璃态”，沥青由玻璃态向高弹态转变的温度即为沥青的脆化点)。为了提高沥青的耐寒性和耐热性，常对沥青进行改性，如在沥青中掺入增塑剂、橡胶、树脂和填料等。

4) 大气稳定性

大气稳定性是指石油沥青在热、阳光、水分和空气等大气因素作用下性能稳定的能力，即沥青的抗老化性能，是沥青材料的耐久性。在自然气候的作用下，沥青的化学组成和性能都会发生变化，低分子物质将逐渐转变为大分子物质，流动性和塑性逐渐减小，硬脆性逐渐增大，直至脆裂，甚至完全松散而失去黏结力。

石油沥青的大气稳定性常用蒸发损失和针入度变化等试验结果进行评定。

2. 石油沥青的分类及技术标准

根据现行标准，石油沥青按用途和性质分为道路石油沥青、建筑石油沥青和普通石油沥青三类，见表 8-1。

表 8-1 石油沥青技术标准

质量指标	道路石油沥青 (SHT 0522—2010)					建筑石油沥青 (GB 494—2010)			普通石油沥青 (SY 1665—1977)		
	200	180	140	100	60	10	30	40	75	65	55
针入度 (25℃,100g) (1/10 mm)	200～300	150～200	110～150	80～110	50～80	10～25	26～35	36～50	75	65	55
延度(25℃)，不小于/cm	20	100	100	90	70	1.5	2.5	3.5	2	1.5	1
软化点/℃	30～48	35～48	38～51	42～55	45～58	95	75	60	60	80	100
溶解度/(%)	99	99	99	99	99	99	99	99	98	98	98
质量变化率/(%)	1.3	1.3	1.3	1.2	1.0	1	1	1	—	—	—
蒸发后针入度比/(%)	—	—	—	—	—	65	65	65	—	—	—
闪点(开口/℃)	180	200	230	230	230	260	260	260	230	230	230

3. 石油沥青的应用

1) 石油沥青的选用

沥青在使用时，应根据当地气候条件、工程性质(房屋、道路、防腐)、使用部位(屋面、下)及施工方法具体选择沥青的品种和牌号。对一般温暖地区、受日晒或经常受热部位，为防止受热软化，应选择牌号较小的沥青；在寒冷地区，夏季暴晒、冬季受冻的部位，不仅要考虑受热软化，还要考虑低温脆裂，应选用中等牌号沥青；对一些不易受温度影响的部位，可选用牌号较大的沥青。当缺乏所需牌号的沥青时，可用不同牌号的沥青进行掺配。

道路石油沥青黏度低、塑性好，主要用于配制沥青混凝土和沥青砂浆，用于道路路面和工业厂房地面等工程。

特别提示

引例(1)的解答：裂缝原因主要由沥青材料老化及低温所致，从裂缝的形状来看，沥青老化低温引起的裂缝大多为横向，且裂缝几乎为等间距，这与该路面破损情况吻合。该路已修筑多年，沥青老化后变硬、变脆，延伸性下降，低温稳定性变差，容易产生裂缝、松散。在冬天，气温下降，沥青混合料受基层的约束而不能收缩，产生了应力，应力超过沥青混合料的极限抗拉强度，路面便产生开裂。因此冬天裂缝尤为明显。

建筑石油沥青黏性较大、耐热性较好、塑性较差，主要用于生产防水卷材、防水涂料、防水密封材料等，广泛应用于建筑防水工程及管道防腐工程。一般屋面用的沥青，软化点应比本地区屋面可能达到的最高温度高 20～25℃，以避免夏季流淌。防水防潮石油沥青质地较软，温度敏感性较小，适于作卷材涂复层。普通石油沥青因含蜡量较高，性能较差，建筑工程中应用很少。

2) 石油沥青的掺配

沥青在实际使用时，某一牌号的沥青不一定能完全满足工程要求，需要用现有的、不同牌号的沥青进行掺配。掺配时注意，要掺配的石油沥青的软化点要在现有两种石油沥青的软化点之间，通常按下式进行掺配：

$$Q_1 = \frac{T_2 - T}{T_2 - T_1} \times 100\% \tag{8-1}$$

$$Q_2 = 100 - Q_1 \tag{8-2}$$

式中 Q_1——牌号较高沥青的掺量(%)；

Q_2——牌号较低沥青的掺量(%)；

T——掺配后所需的软化点(℃)；

T_1——牌号较高沥青的软化点(℃)；

T_2——牌号较低沥青的软化点(℃)。

8.1.2 防水卷材

1. 改性沥青防水卷材

1) 改性沥青

沥青具有良好的塑性，能加工成良好的柔性防水材料。但沥青耐热性与耐寒性较差，即高温下强度低、低温下缺乏韧性，表现为高温易流淌、低温易脆裂，这是沥青防水屋面渗漏现象严重、使用寿命短的原因之一，因而传统的沥青油毡已在全国大范围禁止使用。如前所述，沥青是由分子量几百到几千的大分子化合物组成的复杂混合物，但分子量比通常高分子材料(几万到几百万或以上)小得多，而且其分子量最高(几千)的组分在沥青中的比例较小，决定了沥青材料的强度不高、弹性不好。为此，常添加高分子的聚合物对沥青进行改性。高分子的聚合物分子和沥青分子相互扩散、发生缠结，形成凝聚的网络混合结构，因而具有较高的强度和较好的弹性。按掺用高分子材料的不同，改性沥青可分为橡胶改性沥青、树脂改性沥青、橡胶树脂共混改性沥青 3 类。

(1) 橡胶改性沥青。在沥青中掺入适量橡胶后，可使沥青的高温变形性小，常温弹性较好，低温塑性较好。常用的橡胶有 SBS 橡胶、氯丁橡胶、废橡胶等。

(2) 树脂改性沥青。在沥青中掺入适量树脂后，可使沥青具有较好的耐高低温性、黏结性和不透气性。常用树脂有 APP(无规聚丙烯)、聚乙烯、聚丙烯等。

(3) 橡胶和树脂共混改性沥青。在沥青中掺入适量的橡胶和树脂后，沥青兼具橡胶和树脂的特性，常见的有氯化聚乙烯—橡胶共混改性沥青及聚氯乙烯-橡胶共混改性沥青等。

2) SBS 改性沥青防水卷材

SBS 改性沥青防水卷材是以聚酯纤维无纺布为胎体，以 SBS(苯乙烯-丁二烯-苯乙烯)弹性体改性沥青为浸渍涂盖层，以塑料薄膜或矿物细料为隔离层而制成的防水卷材。这类卷材具有较高的弹性、延伸率、耐疲劳性和低温柔性，主要用于屋面及地下室防水，尤其适用于寒冷地区。以冷法施工或热熔铺贴，适于单层铺设或复合使用。弹性体(SBS)防水卷材物理力学性能见表 8-2。

表 8-2 弹性体(SBS)防水卷材物理力学性能

<table>
<tr><th rowspan="3">序号</th><th rowspan="3" colspan="3">项 目</th><th colspan="5">指 标</th></tr>
<tr><th colspan="2">I</th><th colspan="3">II</th></tr>
<tr><th>PY</th><th>G</th><th>PY</th><th>G</th><th>PYG</th></tr>
<tr><td rowspan="3">1</td><td rowspan="3">拉力</td><td colspan="2">最大峰拉力/(N/50mm)≥</td><td>500</td><td>350</td><td>800</td><td>500</td><td>900</td></tr>
<tr><td colspan="2">次高峰拉力/(N/50mm)≥</td><td>—</td><td>—</td><td>—</td><td>—</td><td>800</td></tr>
<tr><td colspan="2">试验现象</td><td colspan="5">拉伸过程中，试件中部无沥青涂改层开裂或与胎基分离现象</td></tr>
<tr><td rowspan="2">2</td><td rowspan="2">延伸率</td><td colspan="2">最大峰时延伸率/(%) ≥</td><td>30</td><td rowspan="2">—</td><td>40</td><td rowspan="2">—</td><td>—</td></tr>
<tr><td colspan="2">第二峰时延伸率/(%) ≥</td><td>—</td><td>—</td><td>15</td></tr>
<tr><td>3</td><td colspan="3">不透水性 30min</td><td>0.3MPa</td><td>0.2MPa</td><td colspan="3">0.3MPa</td></tr>
<tr><td>4</td><td colspan="3">低温柔性/℃</td><td colspan="2">−20</td><td colspan="3">−25</td></tr>
<tr><td rowspan="3">5</td><td rowspan="3">耐热性</td><td colspan="2">℃</td><td colspan="2">90</td><td colspan="3">105</td></tr>
<tr><td colspan="2">≤mm</td><td colspan="5">2</td></tr>
<tr><td colspan="2">试验现象</td><td colspan="5">无流淌、滴落</td></tr>
<tr><td>6</td><td colspan="3">钉杆撕裂强度/N ≥</td><td colspan="4">—</td><td>300</td></tr>
<tr><td>7</td><td colspan="3">接缝剥离强度/(N/mm) ≥</td><td colspan="5">1.5</td></tr>
</table>

3) APP 改性沥青防水卷材

APP 改性沥青防水卷材是以 APP(无规聚丙烯)树脂改性沥青浸涂玻璃纤维或聚酯纤维(布或毡)胎基，上表面撒以细矿物粒料，表 8-3 面覆以塑料薄膜制成的防水卷材。这类卷材弹塑性好，具有突出的热稳定性和抗强光辐射性，适用于高温和有强烈太阳辐射地区的屋面防水。单层铺设，可冷、热施工。塑性体(APP)防水卷材物理力学性能见表 8-3。

表 8-3　塑性体(APP)防水卷材物理力学性能

序号	项目		指标				
			I		II		
			PY	G	PY	G	PYG
1	拉力	最大峰拉力/(N/50mm)≥	500	350	800	500	900
		次高峰拉力/(N/50mm)≥	—	—	—	—	800
		试验现象	拉伸过程中，试件中部无沥青涂改层开裂或与胎基分离现象				
2	延伸率	最大峰时延伸率/(%)　≥	25	—	40	—	—
		第二峰时延伸率/(%)　≥	—		—		15
3	不透水性 30min		0.3Mpa	0.2Mpa	0.3Mpa		
4	低温柔性/℃		−7		−15		
5	耐热性	℃	110		130		
		≤mm	2				
		试验现象	无流淌、滴落				
6	钉杆撕裂强度/N　≥		—				300
7	接缝剥离强度/(N/mm)　≥		1.0				

SBS 及 APP 防水卷材均属于高聚物改性沥青防水卷材，其外观质量要求见表 8-4。

表 8-4　高聚物改性沥青防水卷材外观质量要求

项　目	质量要求
孔洞、缺边、裂口	不允许
边缘不整齐	不超过 10mm
胎体露白、未浸透	不允许
撒布材料粒度、颜色	均匀
每卷卷材的接头	不超过 1 处，较短的一段不应小于 1 000mm，接头处应加长 150mm

4) 铝箔塑胶改性沥青防水卷材

铝箔塑胶改性沥青防水卷材是以玻璃纤维或聚酯纤维(布或毡)为胎基，用高分子(合成橡胶或树脂)改性沥青为浸渍涂盖层，以银白色铝箔为上表面反光保护层，以矿物粒料和塑料薄膜为底面隔离层而制成的防水卷材。

这种卷材对阳光的反射率高，具有一定的抗拉强度和延伸率，弹性好，低温柔性好，在−20～80℃温度范围内适应性较强，抗老化能力强，具有装饰功能，适用于外露防水面层并且价格较低，是一种中档的新型防水材料。

其他常见的改性沥青防水卷材还有再生橡胶改性沥青防水卷材、丁苯橡胶改性沥青防水卷材、PVC 改性煤焦油防水卷材等。

2. 合成高分子防水材料

合成高分子防水材料具有抗拉强度高、延伸率大、弹性强、高低温特性好、防水性能

优异的特性。合成高分子防水材料中常用的高分子有三元乙丙橡胶、氯丁橡胶、有机硅橡胶、聚氨酯、丙烯酸酯、聚氯乙烯树脂等。

合成高分子防水卷材是以合成橡胶、合成树脂或它们两者的共混体为基材，加入适量的化学助剂、填充料等，经过塑炼、混炼、压延或挤出成型、硫化、定型、检验、分卷、包装等工序加工制成的无胎防水材料。具有抗拉强度高、断裂延伸率大、抗撕裂强度好、耐热耐低温性能优良、耐腐蚀、耐老化、单层施工及冷作业等优点。

特别提示

合成高分子卷材是继改性石油沥青防水卷材之后发展起来的性能更优的新型高档防水材料，显示出独特的优异性。在我国虽仅有十余年的发展史，但发展十分迅猛。现在可生产三元乙丙橡胶、丁基橡胶、氯丁橡胶、再生橡胶、聚氯乙烯、氯化聚乙烯、氯磺化聚乙烯等几十个品种。

合成高分子防水卷材外观质量见表 8-5。

表 8-5　合成高分子防水卷材外观质量

项　　目	质量要求
折痕	每卷不超过 2 处，总长度不超过 20mm
杂质	颗粒不允许大于 0.5mm，每 $1m^2$ 不超过 $9mm^2$
胶块	每卷不超过 6 处，每处面积不大于 $4mm^2$
凹痕	每卷不超过 6 处，深度不超过本身厚度的 30%；树脂类深度不超过 15%
每卷卷材的接头	橡胶类每 20m 不超过 1 处，较短的一段不应小于 3 000mm，接头处应加长 150mm；树脂类 20m 长度内不允许有接头

1) 三元乙丙橡胶防水卷材

三元乙丙橡胶防水卷材是以乙烯、丙烯和双环戊二烯 3 种单体共聚合成的三元乙丙橡胶为主体，掺入适量的丁基橡胶、硫化剂、促进剂、软化剂、补强剂和填充剂等，经密炼、拉片、过滤、挤出(或压延)成型、硫化、检验、分卷、包装等工序加工制成的高弹性防水材料三元乙丙橡胶防水卷材，与传统的沥青防水材料相比，具有防水性能优异、耐候性好、耐臭氧及耐化学腐蚀性强、弹性和抗拉强度高，对基层材料的伸缩或开裂变形适应性强，质量轻、使用温度范围宽(−60～+120℃)、使用年限长(30～50 年)、可以冷施工、施工成本低等优点。适用于高级建筑防水，可单层使用，也可复合使用。施工用冷黏法或自黏法。

2) 聚氯乙烯(PVC)防水卷材

聚氯乙烯防水卷材是以聚氯乙烯树脂为主要原料，加入一定量的稳定剂、增塑剂、改性剂、抗氧剂及紫外线吸收剂等辅助材料，经捏合、混炼、造粒、挤出(或压延)等工序加工制成的防水卷材，是我国目前用量较大的一种卷材。这种卷材具有较高的拉伸和撕裂强度，延伸率较大，耐老化性能好，耐腐蚀性强。其原料丰富，价格便宜，容易黏结。适用于屋面、地下防水工程和防腐工程，单层或复合使用，冷黏法或热风焊接法施工。

聚氯乙烯防水卷材，根据基料的组分极其特性分为两种类型：S 型和 P 型。S 型是以

煤焦油与聚氯乙烯树脂混溶料为基料的柔性卷材；P型是以增塑聚氯乙烯为基料的塑性卷材。S型防水卷材的厚度为：1.80mm、2.00mm、2.50mm；P型防水卷材的厚度为：1.20mm、1.50mm、2.00mm；卷材的宽度为：1 000mm、1 200mm、1 500mm、2 000mm。

3) 氯化聚乙烯防水卷材

氯化聚乙烯防水卷材是以含氯量为30%～40%的氯化聚乙烯树脂为主要原料，掺入适量的化学助剂和大量的填充材料，采用塑料(或橡胶)的加工工艺，经过捏合、塑炼、压延等工序加工而成，属于非硫化型高档防水卷材。

氯化聚乙烯防水卷材分为两种类型：Ⅰ型和Ⅱ型。Ⅰ型防水卷材是属于非增强型的；Ⅱ型是属于增强型的。其规格厚度可分为 1.00mm、1.20mm、1.50mm，2.00mm；宽度为900mm、1 000mm、1 200mm、1 500mm。

知识链接

1. 氯化聚乙烯-橡胶共混防水卷材

氯化聚乙烯-橡胶共混防水卷材是以氯化聚乙烯树脂与合成橡胶为主体，加入硫化剂、促进剂、稳定剂、软化剂及填料等，经塑炼、混炼、过滤、压延(或挤出)成型及硫化等工序加工制成的防水卷材。

这类卷材既具有氯化聚乙烯的高强度和优异的耐久性，又具有橡胶的高弹性和高延伸性以及良好的耐低温性能。其性能与三元乙丙橡胶卷材相近，使用年限保证10年以上，但价格却低得多。与其配套的氯丁黏结剂，较好地解决了与基层黏结的问题。属中高档防水材料，可用于各种建筑、道路、桥梁、水利工程的防水，尤其是适用于寒冷地区或变形较大的屋面、单层或复合使用，冷黏法施工。

2. 氯磺化聚乙烯防水卷材

氯磺化聚乙烯防水卷材是以氯磺化聚乙烯橡胶为主，加入适量的软化剂、交联剂、填料、着色剂后，经混炼、压延(或挤出)、硫化等工序加工而成的弹性防水卷材。

氯磺化聚乙烯防水卷材的耐臭氧、耐老化、耐酸碱等性能突出，且拉伸强度高、耐高低温性好、断裂伸长率高，对防水基层伸缩和开裂变形的适应性强，使用寿命为15年以上，属于中高档防水卷材。氯磺化聚乙烯防水卷材可制成多种颜色，用这种彩色防水卷材作屋面外露防水层可起到美化环境的作用。氯磺化聚乙烯防水卷材特别适用于有腐蚀介质影响的部位做防水与防腐处理，也可用于其他防水工程。

8.1.3 防水涂料与密封材料

1. 防水涂料

1) 溶剂型改性沥青防水涂料

溶剂型改性沥青防水涂料是以沥青、溶剂、改性材料、辅助材料所组成的，主要用于防水、防潮和防腐，其耐水性、耐化学侵蚀性均好，涂膜光亮平整，丰满度高。主要品种有：再生橡胶沥青防水涂料、氯丁橡胶沥青防水涂料、丁基橡胶沥青防水涂料等，均为较好的防水涂料。但由于使用有机溶剂，不仅在配制时易引起火灾，且施工时要求基层必须干燥；有机溶剂挥发时，还引起环境污染，加之目前溶剂市场价格不断上扬，因此，除特殊情况外，已较少使用。近年来，大力推广和应用的是水乳型沥青防水涂料。

2) 水乳型改性沥青防水涂料

(1) 水乳型氯丁橡胶沥青防水涂料是以氯丁橡胶胶乳为改性剂，及助剂的配合与沥青乳液混合所形成的稳定橡胶沥青乳状液。适用于民用及工业建筑的屋面工程、厕浴间、厨房防水；地下室、水池等防水、防潮工程，旧油毡屋面的维修。

(2) 水乳型再生橡胶沥青防水涂料是以再生橡胶的水分散体为改性剂，及助剂的配合与沥青乳液混合所形成的稳定再生橡胶沥青乳状液。适用于4级建筑的屋面工程、厕浴间、厨房防水，地下室防潮工程，旧油毡屋面的维修。

3) 聚氨酯防水涂料

聚氨酯防水涂料有单组分和双组分两类，目前主要应用双组分聚氨酯防水涂料。双组分聚氨酯防水涂料产品的甲组分是聚氨酯预聚体，乙组分是固化剂等多种改性剂组成的液体；它们按一定的比例混合均匀，经过固化反应，形成富有弹性的整体防水膜。

聚氨酯防水涂料形成的薄膜与混凝土、马赛克、大理石、木材、钢材、铝合金黏结良好，具有优异的耐候性、耐油性、耐碱性、耐臭氧性、耐海水侵蚀性，使用寿命为10～15年，而且强度高、弹性好、延伸率大(可达350%～500%)。

聚氨酯防水涂料又分为有焦油型和无焦油型。有焦油型是以焦油等填充剂、改性剂组成固化剂的。无焦油型聚氨酯防水涂料综合性能优于焦油型聚氨酯防水涂料。无焦油聚氨酯防水涂料色浅，可制成铁红、草绿、银灰等彩色涂料，涂膜反应速度易于控制，属于高档防水涂料，主要用于中高级建筑的屋面、外墙、地下室、卫生间、贮水池及屋顶花园等防水工程。焦油聚氨酯防水涂料，因固化剂中加入了煤焦油，使涂料黏度降低，易于施工，且价格相对较低，使用量超过无焦油聚氨酯防水涂料。但煤焦油对人体有害，不能用于冷库内壁和饮用水防水工程，其他适用范围同无焦油聚氨酯防水涂料。

知识链接

1. 丙烯酸酯防水涂料

丙烯酸酯防水涂料是以丙烯酸树脂乳液为主，加入适量的颜料、填料等配置而成的水乳型防水涂料。具有耐高低温性好、不透水性强、无毒、无味、无污染、操作简单等优点，可在各种复杂的基层表面上施工，并具有白色、多种浅色、黑色等，使用寿命10～15年。丙烯酸酯防水涂料广泛应用于外墙防水装饰及各种彩色防水层。丙烯酸酯涂料的缺点是延伸率较小，为此可加入合成橡胶乳液予以改性，使其形成橡胶状弹性涂膜。

2. 硅橡胶防水涂料

硅橡胶防水涂料是以硅橡胶乳液以及其他乳液的复合物为基料，掺入无机填料及各种助剂配制而成的乳液型防水涂料。该涂料兼有涂膜防水和渗透性防水材料的优良特性，具有良好的防水性、渗透性、成膜性、弹性、黏结性、延伸性、耐高低温性、抗裂性、耐氧化性和耐候性，并且无毒、无味、不燃、使用安全。适用于地下室、卫生间、屋面以及地上地下构筑物的防水防渗和渗漏水修补等工程。

硅橡胶防水涂料共有Ⅰ型涂料和Ⅱ型涂料两个品种。Ⅱ型涂料加入了一定量的改性剂以降低成本，但性能指标除低温韧性略有升高以外，其余指标与Ⅰ型涂料都相同。Ⅰ型涂料和Ⅱ型涂料均由1号涂料和2号涂料组成，涂布时进行复合使用，1号、2号均为单组分，1号涂布于底层和面层，2号涂布于中间加强层。

2. 密封材料

1) 改性沥青基嵌缝油膏

改性沥青基嵌缝油膏是以石油沥青为基料，加入废橡胶粉等改性材料、稀释剂及填充料等混合制成的冷用膏状材料；具有优良的防水防潮性能、黏结性好、延伸率高，能适应结构的适当伸缩变形，能自行结皮封膜；可用于嵌填建筑物的水平、垂直缝及各种构件的防水，使用很普遍。

2) 丙烯酸酯建筑密封膏

丙烯酸酯建筑密封膏是在丙烯酸乳液中掺入少量表面活性剂、增塑剂、改性剂及颜料、填料等配制而成的单组分水乳型建筑密封膏。这种密封膏具有优良的耐紫外线性能和耐油性、黏结性、延伸性、耐低温性、耐热性和耐老化性，并且以水为稀释剂，黏度较小，无污染、无毒、不燃，安全可靠，价格适中，可配成各种颜色，操作方便，干燥速度快，保存期长。但固化后有15%～20%的收缩率，应用时应予事先考虑。该密封膏应用范围非常广泛，可用于钢、铝、混凝土、玻璃和陶瓷等材料的嵌缝防水以及用作钢窗、铝合金窗的玻璃泥子等，还可用于各种预制墙板、屋面、门窗、卫生间等的接缝密封防水及裂缝修补。

3) 聚氨酯建筑密封膏

聚氨酯密封膏弹性高、延伸率大、黏结力强，耐油、耐磨、耐酸碱，抗疲劳性和低温柔性好，使用年限长；适用于各种装配式建筑的屋面板、楼地板、墙板、阳台、门窗框、卫生间等部位的接缝及施工密封，也可用于贮水池、引水渠等工程的接缝密封、伸缩缝的密封、混凝土修补等。

4) 有机硅密封膏

有机硅密封膏具有优良的耐热性、耐寒性和耐候性。硫化后的密封膏可在-20～250℃范围内长期保持高弹性和拉压循环性，并且黏结性能好，耐油性、耐水性和低温柔性优良，能适应基层较大的变形，外观装饰效果好。

8.1.4 防水材料的选用

选用防水材料是防水设计的重要一环，具有决定性的意义。现在材料品种繁多、形态不一、性能各异、价格高低悬殊，施工方式也各不相同。这就要求选定的防水材料必须适应工程要求，工程地质水文、结构类型、施工季节、当地气候、建筑使用功能以及特殊部位等，对防水材料都有具体要求。

1. 根据气候条件选材

(1) 我国地域辽阔，南北气温高低悬殊，江南地区夏季气温达四十余度，持续数日，暴露在屋面的防水层要经受长时间的暴晒，防水材料易于老化。选用的材料应耐紫外线能力强，软化点高，如APP改性沥青卷材、三元乙丙橡胶卷材、聚氯乙烯卷材等。

(2) 南方多雨，北方多雪，西部干旱。我国年降雨量在1 000mm以上的约有15个省市自治区，阴雨连绵的日子有200天，屋面始终是湿漉漉的，排水不畅而积水，一连数月不干，浸泡防水层。耐水性不好的涂料，易发生再乳化或水化还原反应；不耐水泡的黏结剂，黏结强度严重降低，使黏结合缝的高分子卷材开裂，特别是内排水的天沟，极易因长时间积水浸泡而渗漏。为此应选用耐水材料，如聚酯胎的改性沥青卷材或耐水的胶黏剂黏合高分子卷材。

(3) 干旱少雨的西北地区，蒸发量远大于降雨量，常常雨后不见屋檐水。这些地区显然对防水的程度有所降低，二级建筑做一道设防也能满足防水要求，如果作好保护层，能够达到耐用年限。

(4) 严寒多雪地区，有些防水材料经不住低温冻胀收缩的循环变化，过早老化断裂一年中有四五个月被积雪覆盖，雪水长久浸渍防水层，同时雪融又结冰，抗冻性不强、耐水不良胶黏剂都将失效。这些地区宜选用 SBS 改性沥青卷材或焊接合缝的高分子卷材，如果选用不耐低温的防水材料，应作倒置房屋面。

(5) 防水施工季节也是不能忽视的。在华北地区秋季气温亦很低，水溶性涂料不能使用，胶黏剂在 5℃时即会降低黏结性能，在零下的温度下更不能施工。冬季施工胶黏剂遇混凝土而冻凝，丧失黏合力，卷材合缝粘不牢，会致使施工失败。应注意了解选用材料的适应温度。防水层施工环境气温条件，见表 8-6。

表 8-6　防水层施工环境气温条件

防水层材料	施工环境气温
高聚物改性沥青防水卷材	冷黏法不低于 5℃，热熔法不低于−10℃
合成高分子防水卷材	冷黏法不低于 5℃，热风焊接法不低于−10℃
有机防水涂料	溶剂型−5～35℃，水溶型 5～35℃
无机防水涂料	5～35℃
防水混凝土、水泥砂浆	5～35℃

特别提示

引例(2)的解答：夏季中午炎热，屋顶受太阳辐射，温度较高。此时铺贴沥青防水卷材基层中的水汽会蒸发，集中于铺贴的卷材内表面，并会使卷材鼓泡。此外，高温时沥青防水卷材软化，卷材膨胀，当温度降低后卷材产生收缩，导致短裂。还需指出的是，沥青中还含有对人体有害的挥发物，在强烈阳光照射下，会使操作工人得皮炎等疾病，故铺贴沥青防水卷材应尽量避开炎热中午。

2. 根据建筑部位选材

不同的建筑部位对防水材料的要求也不尽相同。每种材料都有各自的长处和短处，任何一种优质的防水材料也不能适应所有的防水场合，各种材料只能互补而不可取代。屋面防水和地下室防水，要求材料性能不同，而浴间的防水和墙面防水更有差别，坡屋面、外形复杂的屋面、金属板基层屋面也不相同，选材时均应当区别对待。

(1) 屋面防水层暴露在大自然中，受到狂风吹袭、雨雪侵蚀和严寒酷暑影响，昼夜温差的变化胀缩反复，没有优良的材料性能和良好的保护措施难以达到要求的耐久年限。所以应选择抗拉强度高、延伸率大、耐老化好的防水材料。如聚酯胎高聚物改性沥青卷材、三元乙丙橡胶卷材、P 型聚氯乙烯卷材(焊接合缝)、单组分聚氨酯涂料(加保护层)。

(2) 墙体渗漏大多由于墙体太薄，渗漏墙体多为轻型砌块砌筑，存在大量内外通缝，门窗樘与墙的结合处密封不严，雨水由缝中渗入。墙体防水不能用卷材，只能用涂料，而

且要和外装修材料结合。窗樘安装缝用密封膏才能有效解决渗漏问题。

(3) 地下建筑防水选材。地下防水层长年浸泡在水中或十分潮湿的土壤中，防水材料必须耐水性好，不能用易腐烂的胎体制成的卷材，底板防水层应用厚质的并且有一定抵抗扎刺能力的防水材料，最好叠层 6～8mm 厚。如果选用合成高分子卷材，最宜热焊合接缝。使用胶黏剂合缝者，其胶必须耐水性优良。使用防水涂料应慎重，单独使用厚度要 2.5mm，与卷材复合使用厚度也要 2mm。

(4) 厕浴间的防水有 3 个特点：一是不受大自然气候的影响，温度变化不大，对材料的延伸率要求不高；二是面积小，阴阳角多，穿楼板管道多；三是墙面防水层上贴瓷砖，必须与黏结剂亲和性能好。根据以上 3 个特点，不能选用卷材，只有涂料合适，涂料中又以水泥基丙烯酸酯涂料最为合适，是由于能在上面牢固地粘贴瓷砖。

3. 根据工程条件要求选材

(1) 建筑等级是选择材料的首要条件。Ⅰ、Ⅱ级建筑必须选用优质防水材料，如聚酯胎高聚物改性沥青卷材、合成高分子卷材、复合使用的合成高分子涂料。Ⅲ、Ⅳ级建筑选材范围较宽。屋面防水等级和设防要求见表 8-7。

表 8-7　屋面防水等级和设防要求

项目		屋面防水等级			
		Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ
功能性质	建筑物类别	特别重要的民用建筑和对防水有特殊要求的工业建筑	重要的工业与民用建筑、高层建筑	一般工业与民用建筑	非永久性的建筑
	防水层耐用年限	25 年以上	15 年以上	10 年以上	5 年以上
防水措施选择	防水层选用材料	宜选用合成高分子防水卷材、高聚物改性沥青防水卷材、合成高分子防水涂料、细石防水混凝土等材料	宜选用高聚物改性沥青防水卷材、合成高分子防水卷材、高聚物改性沥青防水涂料、细石防水混凝土、平瓦等材料	宜选用三毡四油沥青防水卷材、高聚物改性沥青防水卷材、合成高分子防水卷材、高聚物改性沥青防水涂料、合成高分子防水涂料、沥青基防水涂料、刚性防水层、平瓦、油毡瓦等材料	可选用二毡三油沥青防水卷材、高聚物改性沥青防水涂料、沥青基防水涂料、波形瓦等材料
	设防要求	三道或三道以上防水设防，其中必须有一道合成高分子防水卷材，且只能有一道 2mm 以上厚的合成高分子防水涂膜	两道防水设防，其中必须有一道卷材，也可采用压型钢板进行一道设防	一道防水设防或两种防水材料复合使用	一道防水设防

(2) 坡屋面用瓦。黏土瓦、沥青油毡瓦、混凝土瓦、金属瓦、木瓦、石板瓦、竹瓦的下面必须另用柔性防水层。因有固定瓦钉穿过防水层，要求防水层有握钉能力，防止雨水沿钉渗入望板。最合适的卷材是 4mm 厚高聚物改性沥青卷材，而高分子卷材和涂料都不适宜。

(3) 振动较大的屋面，如近铁路、地震区、厂房内有天车锻锤、大跨度轻型屋架等。因振动较大，砂浆基层极易裂缝，满粘的卷材易被拉断。因此应选用高延伸率和高强度的卷材或涂料，如三元乙丙橡胶卷材、聚酯胎高聚物改性沥青卷材、聚氯乙烯卷材，且应昼空铺或点粘施工。

(4) 不能上人的陡坡屋面(多在60°以上)，因为坡度很大，防水层上无法作块体保护层，所以一般选带矿物粒料的卷材或者选用铝箔覆面的卷材、金属卷材。

4. 根据建筑功能要求选材

(1) 屋面作园林绿化，美化城区环境。防水层上覆盖种植土种植花木。植物根系穿刺力很强，防水层除了耐腐蚀耐浸泡之外，还要具备抗穿刺能力。选用聚乙烯土工膜(焊接接缝)、聚氯乙烯卷材(焊接接缝)。铅锡合金卷材、抗生根的改性沥青卷材。

(2) 屋面作娱乐活动和工业场地，如舞场、小球类运动场、茶社、晾晒场、观光台等。防水层上应铺设块材保护层，防水材料不必满粘。对卷材的延伸率要求不高，多种涂料都能用，也可作刚柔结合的复合防水。

(3) 倒置式屋面是保温层在上、防水层在下的做法。保温层保护防水层不受阳光照射，也免于暴雨狂风的袭击和严冬酷暑的折磨。选用的防水材料范围很宽，但是施工要特别精心细致，确保耐用年限内不漏。如果发生渗漏，防渗堵漏很困难，往往需要翻掉保温层和镇压层，维修成本很高。

(4) 屋面蓄水层底面。底面直接被水浸泡，但水深一般不超过25cm。防水层长年浸泡在水中，要求防水材料耐水性好。可选用聚氨酯涂料、硅橡胶涂料、全盛高分子卷材(热焊合缝)、聚乙烯土工膜、铅锡金属卷材，不宜使用用胶黏合的卷材。

8.2 绝热材料



让我们来看看以下现象，并思考问题。

许多新建房屋在墙体外侧覆盖一层白色的材料，这些材料起什么作用?

8.2.1 绝热材料的作用和基本要求

在建筑中，习惯上把用于控制室内热量外流的材料叫作保温材料；把防止室外热量进入室内的材料叫作隔热材料。保温、隔热材料统称为绝热材料。

1. 绝热材料的作用

建筑绝热保温材料是建筑节能的物质基础。性能优良的建筑绝热保温材料和良好的保温技术，在建筑和工业保温中往往可起到事半功倍的效果。统计表明，建筑中每使用1t矿物棉绝热制品，每年可节约1t燃油。同时，建筑使用功能的提高，使人们对建筑的吸声隔声性能的要求也越来越高。随着近年来人们对环境保护意识的增强，噪声污染对人们的健

康和日常生活的危害日益为人们所重视，建筑的吸声功能在诸多建筑功能中的地位逐步增高。保温绝热材料由于其轻质及结构上的多孔特征，故具有良好的吸声性能。对于一般建筑物来说，吸声材料无须单独使用，其吸声功能是与保温绝热及装饰等其他新型建材相结合来实现的。因此在改善建筑物的吸声功能方面，新型建筑隔热保温材料起着其他材料所无法替代的作用。

2. 绝热材料的基本要求

导热性指材料传递热量的能力。材料的导热能力用导热系数 λ 表示。导热系数的物理意义为：在稳定传热条件下，当材料层单位厚度内的温差为 1℃时，在 1h 内通过 $1m^2$ 表面积的热量。材料导热系数越大，导热性能越好。工程上将导热系数 $\lambda<0.23$W/(m·K)的材料称为绝热材料。

影响材料导热系数的因素有以下几方面。

(1) 材料本身性质。材料的导热系数由大到小为，金属材料＞无机非金属材料＞有机材料。

(2) 微观结构。相同组成的材料，结晶结构的导热系数最大，微晶结构次之，玻璃体结构最小。为了获取导热系数较低的材料，可通过改变其微观结构的方法来实现，如水淬矿渣即是一种较好的绝热材料。

(3) 孔隙率。孔隙率越大，材料导热系数越小。

(4) 孔隙特征。在孔隙相同时，孔径越大，孔隙间连通越多，导热系数越大，这是由于孔中气体产生对流。纤维状材料存在一个最佳表观密度，即在该密度时导热系数最小。当表观密度低于这个最佳值时，其导热系数有增大趋势。

(5) 含水率。所有的保温材料都具有多孔结构，容易吸湿。当含水率大于 5%～10%，材料吸水后水分占据了原被空气充满的部分气孔空间，由于水的导热系数 λ=0.58W/(m·K)远大于空气，所以材料含水率增加后其导热系数将明显增加，若受冻[冰 λ=2.33W/(m·K)]则导热能力更大。

(6) 热流方向。

导热系数与热流方向的关系，仅仅存在于各向异性的材料中，即在各个方向上构造不同的材料中。传热方向和纤维方向垂直时的绝热性能比传热方向和纤维方向平行时要好一些；同样，具有大量封闭气孔的材料的绝热性能也比具大量有开口气孔的要好一些。气孔质材料又进一步分成固体物质中有气泡和固体粒子相互轻微接触两种。纤维质材料从排列状态看，分为纤维方向与热流方向垂直和纤维方向与热流方向平行两种情况。一般情况下纤维保温材料的纤维排列是后者或接近后者，同样密度条件下，其导热系数要比其他形态的多孔质保温材料的导热系数小得多。

室内外之间的热交换除了通过材料的传导传热方式外，辐射传热也是一种重要的传热方式，铝箔等金属薄膜，由于具有很强的反射能力，具有隔绝辐射传热的作用，因而也是理想的绝热材料。

特别提示

绝热材料除应具有较小的导热系数外，还应具有适宜的或一定的强度、抗冻性、耐水性、防火性、耐热性和耐低温性、耐腐蚀性，有时还需具有较小的吸湿性或吸水性等。优良的绝热

材料应是具有很高的孔隙率的，且以封闭、细小孔隙为主的，吸湿性和吸水性较小的有机或无机非金属材料。多数无机绝热材料的强度较低，吸湿性或吸水性较高，使用时应予以注意。

8.2.2　常用绝热材料

绝热材料按照它们的化学组成可以分为无机绝热材料和有机绝热材料。

1. 常用无机绝热材料

1) 多孔轻质类无机绝热材料

蛭石是一种有代表性的多孔轻质类无机绝热材料，它由云母类矿物经风化而成，具有层状结构，如图8.6所示。将天然蛭石经破碎、预热后快速通过煅烧带，可使蛭石膨胀20～30倍。膨胀蛭石的导热系数约为0.046～0.070W/(m·K)，可在1 000℃的高温下使用,主要用于建筑夹层，但需注意防潮。膨胀蛭石也可用水泥、水玻璃等胶结材胶结成板，用作板壁绝热，但其导热系数值比松散状要大，一般为0.08～0.10W/(m·K)。



图8.6　蛭石

2) 纤维状无机绝热材料

(1) 矿物棉。岩棉和矿渣棉统称矿物棉，由熔融的岩石经喷吹制成的纤维材料称为岩棉，如图8.7所示，由熔融矿渣经喷吹制成的纤维材料称为矿渣棉。将矿物棉与有机胶结剂结合可以制成矿棉板、毡、管壳等制品，其堆积密度约为45～150kg/m^3，导热系数约为0.044～0.049W/(m·K)。由于堆积密度低的矿物棉内空气可发生对流而导热，因而，其导热系数反而略高，最高使用温度约为600℃。矿物棉也可制成粒状棉用作填充材料，其缺点是吸水性大、弹性小。



图8.7　岩棉

(2) 玻璃纤维。玻璃纤维一般分为长纤维和短纤维。短纤维由于相互纵横交错在一起，构成了多孔结构的玻璃棉，常用作绝热材料，如图 8.8 所示。玻璃棉堆积密度约为 45～150kg/m^3，导热系数约为 0.035～0.041W/(m·K)。玻璃纤维制品的纤维直径对其导热系数有较大影响，导热系数随纤维直径的增大而增加。以玻璃纤维为主要原料的保温隔热制品主要有沥青玻璃棉毡和酚醛玻璃棉板以及各种玻璃毡、玻璃毯等，通常用于房屋建筑的墙体保温层。



图 8.8　玻璃纤维短切丝

3) 泡沫状无机绝热材料

(1) 泡沫玻璃。泡沫玻璃是用玻璃细粉和发泡剂(石灰石、碳化钙和焦炭)经粉磨、混合、装模、煅烧(800℃左右)而得到的多孔材料，如图 8.9 所示。泡沫玻璃导热系数小、抗压强度高、抗冻性好、耐久性好，并且对水分、水蒸气和其他气体具有不渗透性，还容易进行机械加工，可锯、钻、车及打钉等。表观密度为 150～200kg/m^3 的泡沫玻璃，其导热系数约为 0.042～0.048W/(m·K)，抗压强度达 0.16～0.55MPa。泡沫玻璃作为绝热材料在建筑上主要用于保温墙体、地板、天花板及屋顶保温，可用于寒冷地区建筑低层的建筑物。

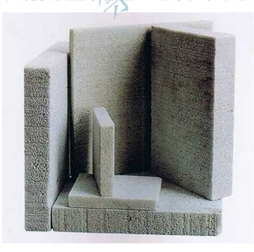


图 8.9　泡沫玻璃

(2) 多孔混凝土。多孔混凝土是指具有大量均匀分布、直径小于 2mm 的封闭气孔的轻质混凝土，主要有泡沫混凝土和加气混凝土。随着表观密度的减小，多孔混凝土的绝热效果增加，但强度下降。

2. 常用有机绝热材料

1) 泡沫塑料

泡沫塑料是以各种树脂为基料，加入各种辅助料经加热发泡制得的轻质保温材料。泡沫塑料目前广泛用作建筑上的保温隔声材料，其表观密度很小、隔热性能好、加工使用方便。常用的泡沫塑料有聚苯乙烯泡沫塑料、脲醛泡沫塑料、聚氨酯泡沫塑料、聚氯乙烯泡沫塑料、泡沫酚醛塑料等。

特别提示

引例的解答：新建房屋的外表面覆盖的白色材料多数为泡沫塑料，起到墙体保温作用，是改善建筑热环境的一个重要手段，起到了节约能源的作用。

2) 硬质泡沫橡胶

硬质泡沫橡胶用化学发泡法制成。特点是导热系数小而强度大。硬质泡沫橡胶的表观密度在 0.064～0.12g/cm^3。表观密度越小，保温性能越好，但强度越低。硬质泡沫橡胶的抗碱和盐的侵蚀能力较强，但强无机酸及有机酸对它有侵蚀作用。它不溶于醇等弱溶剂，但易被某些强有机溶剂软化溶解。硬质泡沫橡胶为热塑性材料，耐热性不好，在 65℃左右开始软化。硬质泡沫橡胶有良好的低温性能，低温下强度较高且有较好的体积稳定性，可用于冷冻库。

8.3 吸声与隔声材料



引 例

看看以下现象，并思考问题。

(1) 为什么影剧院或音乐厅的墙体表面覆盖了一层多孔材料？它起什么作用？

(2) 高级宾馆的地面铺了地毯，为什么会使走路声音变小？

8.3.1 吸声材料

吸声材料是一种能在较大程度上吸收由空气传递的声波能量的建筑材料。这类材料的结构中充满了许多微小的孔隙和连通的气泡，当声波入射到吸声材料内互相贯通的孔隙时，声波将引起微孔及空隙间的空气运动，使紧靠孔壁或纤维表面处的空气受到阻碍不易振动，促使声波削弱。同时还由于小孔隙中空气的黏滞性，使部分声能转变为热能，孔壁纤维的热传导使其热能散失或被吸收掉，从而声波逐渐衰弱、消失。所以在音乐厅、影剧院、大会堂等内部的墙面、地面、天棚等部位，适当采用吸声材料能改善声波在室内传播的质量，保持良好的音响效果。

1. 吸声材料的性能要求

吸声材料的吸声性能以吸声系数α表示。吸声系数的值在 0～1，材料的吸声系数α越

高，吸声效果越好。当需要吸收大量声能降低室内混响及噪声时，常常需要使用高吸声系数的材料，如离心玻璃棉、岩棉等，5cm 厚的 24 kg/m³ 的离心玻璃棉的吸声系数可达到 0.95。

125Hz、250Hz、500Hz、1 000Hz、2 000Hz、4 000Hz 这 6 个频率的平均吸声系数大于 0.2 的材料，称为吸声材料。常用材料吸声系数见表 8-8。为发挥吸声材料的作用，材料的气孔应是开放的，且应相互连通。气孔越多，吸声性能越好。大多数吸声材料强度较低，设置时要注意避免撞坏。多孔的吸声材料易于吸湿，安装时应考虑到胀缩的影响，还应考虑防火、防腐、防蛀等问题。

表 8-8　常用材料的吸声系数

材料种类及名称		厚度/cm	各种频率/Hz 下的吸声系数						装置情况
			125	250	500	1 000	2 000	4 000	
无机材料	石膏板(有花纹)	—	0.03	0.05	0.06	0.09	0.04	0.06	贴实
	水泥蛭石板	4.0	—	0.14	0.46	0.78	0.50	0.60	贴实
	石膏砂浆(掺水泥玻璃纤维)	2.2	0.24	0.12	0.09	0.30	0.32	0.83	粉刷在墙上
	水泥膨胀珍珠岩板	5	0.16	0.46	0.64	0.48	0.56	0.56	贴实
	水泥砂浆	1.7	0.21	0.16	0.25	0.40	0.42	0.48	—
	砖(清水墙面)	—	0.02	0.03	0.04	0.04	0.05	0.05	—
有机材料	软木板	2.5	0.05	0.11	0.25	0.63	0.70	0.70	贴实
	木丝板	3.0	0.10	0.36	0.62	0.53	0.71	0.90	钉在木龙骨上　后留 10cm 空气层
	胶合板(三夹板)	0.3	0.21	0.73	0.21	0.19	0.08	0.12	后留 5cm 空气层
	穿孔五夹板	0.5	0.01	0.25	0.55	0.30	0.16	0.19	后留 5～15cm 空气层
	木花板	0.8	0.03	0.02	0.03	0.03	0.04	—	后留 5cm 空气层
	木制纤维板	1.1	0.06	0.15	0.28	0.30	0.33	0.31	后留 5cm 空气层
纤维材料	矿渣棉	3.13	0.10	0.21	0.60	0.95	0.85	0.72	贴实
	玻璃棉	5.0	0.06	0.08	0.18	0.44	0.72	0.82	贴实
	酚醛玻璃纤维板	8.0	0.25	0.55	0.80	0.92	0.98	0.95	贴实
	工业毛毡	3.0	0.10	0.28	0.55	0.60	0.60	0.56	紧贴于墙上
多孔材料	泡沫玻璃	4.4	0.11	0.32	0.52	0.44	0.52	0.33	贴实
	脲醛泡沫塑料	5.0	0.22	0.29	0.40	0.68	0.95	0.94	贴实
	泡沫水泥(外粉刷)	2.0	0.18	0.05	0.22	0.48	—	0.32	紧贴墙
	吸声蜂窝板	—	0.27	0.12	0.42	0.86	0.48	0.30	—
	泡沫塑料	1.0	0.03	0.06	0.12	0.41	0.85	0.67	—

2. 吸声材料的种类及吸声结构

建筑上常用吸声材料及其吸声结构有如下几种。

1) 多孔吸声材料

这种材料内部有大量的微小孔隙或空腔，彼此沟通。这类多孔材料的吸声系数一般从低频到高频逐渐增大，故对中频和高频的声音吸收效果较好。材料中开放的、互相连通的、细致的气孔越多，其吸声性能越好。

特别提示

引例(1)的解答：影剧院或音乐厅的墙体表面覆盖的多孔材料为吸声材料，其目的是为了减少声音的反射，造成“混响”，改善音质。

2) 薄板振动吸声结构

建筑中通常利用胶合板、石棉板、纤维板、薄木板等板材与墙面龙骨组成空腔，声腔作用于腔体形成共振，即构成薄板振动吸声结构。薄板振动吸声结构具有良好的低频吸声效果。

3) 共振吸声结构

共振吸声结构具有封闭的空腔和较小的开口，很像个瓶子。当瓶腔内空气受到外力激荡，会按一定的频率振动，因摩擦而消耗声能，这就是共振吸声器。为了获得较宽频带的吸声性能，常采用组合共振吸声结构。

4) 穿孔板组合共振吸声结构

穿孔板组合共振吸声结构与单独的共振吸声器相似，可看作是许多个单独共振器并联而成。这种吸声结构由穿孔的胶合板、硬质纤维板、石膏板、铝合板、薄钢板等，将周边固定在龙骨上，并在背后设置空气层而构成，在建筑中使用比较普遍。

5) 柔性吸声材料

柔性吸声材料是具有密闭气孔和一定弹性的材料，如聚氯乙烯泡沫塑料，表面似为多孔材料，但因具有密闭气孔，声波引起的空气振动不易直接传递至材料内部，只能相应的产生振动，在振动过程中由于克服材料内部的摩擦而消耗了声能。

6) 悬挂空间吸声体

悬挂于空间的吸声体，由于声波与吸声材料有两个或两个以上的表面接触，增加了有效的吸声面积，产生了边缘效应，加上声波的衍射作用，提高了实际吸声效果。实际使用时，可根据不同要求设计成各种形式的悬挂空间吸声体，有平板形、球形、圆锥形、棱锥形等多种形式。

7) 帘幕吸声体

帘吸声体是用具有通气性能的纺织品，安装在离墙面或窗洞一定距离处，背后设置空气层制成的。这类材料有灯芯绒、平绒、布材等，可用于中高频声波的吸收。帘幕的吸声效果沿与材料种类和褶纹有关。帘幕吸声体安装、拆卸方便，兼具装饰作用，应用价值较高。

8.3.2 隔声材料

建筑上把主要起隔绝声音作用的材料称为隔声材料。隔声材料主要用于外墙、门窗、隔墙以及楼板地面等处。声音可分为通过空气传播的空气声和通过撞击或振动传播的固体声，两者的隔声原理截然不同，对围护结构的要求也不相同。固体声的隔绝主要是吸收，这和吸声材料是一致的；而空气声的隔绝主要是反射，因此必须选择密实、沉重的材料(如黏土砖、钢板等)作为隔声材料。

对于隔绝固体声音最有效的措施是采用不连续结构处理。即在墙壁和承重梁之间、房屋的框架和墙壁及楼板之间加弹性衬垫，这些衬垫的材料大多可以采用上述吸声材料，如毛毡、软木等。

门窗是建筑物围护结构中隔声最薄弱的部分，其相对于墙来说单位质量小，周边的缝隙也是传声的主要途径。提高门隔声能力的关键在于对门扇及其周边缝隙的处理。隔声门应为面密度较大的复合构造，轻质的夹板门可以铺贴强吸声材料；门扇边缘可以用橡胶、泡沫塑料等的垫圈、门条进行密封处理。对于不开启的观察窗容易进行隔声处理，但很难提高可开启的窗户的隔声量。

改善楼板隔绝撞击声性能的主要措施有：在承重楼板上铺设用塑料橡胶布、地毯、地板等软质弹性材料制成的弹性面层，可减弱楼板所受的撞击，减弱结构层的振动；在承重楼板下加设石膏板等吊顶，可以改善楼板隔绝空气噪声和撞击噪声的性能。

特别提示

引例(2)的解答：楼板铺上地毯后，会减弱楼板所受的撞击，减弱结构层的振动，即减小了噪声。

8.3.3 吸声材料和隔声材料的区别

吸声材料和隔声材料的区别在于：吸声材料着眼于入身声源一侧反射声能的大小，目标是反射声能要小；隔声材料着眼于入射声源另一侧的透射声能的大小，目标是透射声能要小。吸声材料对入射声能的衰减吸收，一般只有十分之几，因此，其吸声能力即吸声系数用小数表示(0～1)；而隔声材料可使透射声能衰减到入射声能的 3/10～4/10 或更小，为方便表达，其隔声量用分贝的计量方法表示，即声音降低多少分贝。

这两种材料在材质上的差异是吸声材料对入射声能的反射很小，这意味着声能容易进入和透过这种材料。可以想象，这种材料的材质应该是多孔、疏松和透气的，这就是典型的多孔性吸声材料，它在工艺上通常用纤维状、颗粒状或发泡材料以形成多孔性结构。它的结构特征是：材料中具有大量的、互相贯通的、从表到里的微孔，也即具有一定的透气性。当声波入射到多孔材料表面时，引起微孔中的空气振动，由于摩擦阻力和空气的黏滞阻力以及热传导作用，将相当一部分声能转化为热能，从而起吸声作用。

对于隔声材料，要减弱透射声能，阻挡声音的传播，就不能如同吸声材料那样疏松、多孔、透气；相反，它的材质应该是重而密实的，如铅板、钢板等一类材料。隔声材料材质的要求是密实无孔隙或缝隙、有较大的重量。由于这类隔声材料密实，难于吸收和透过声能而反射性能强，所以它的吸声性能差。

8.4　建 筑 塑 料



日常电气照明用设备的零件、开关插座及电气绝缘零件等塑料的原料一般为热固性塑料，试分析原因。

塑料是以树脂(通常为合成树脂)为主要基料，与其他原料在一定条件下经混炼、塑化成型，在常温常压下能保持产品形状不变的材料。塑料在一定温度和压力下具有较大的塑性，容易做成所需要的各种形状尺寸的制品，而成型以后在常温下又能保持既得的形状和必需的强度。建筑塑料相对于传统的建筑材料而言，有着许多优点，在建筑上可作为装饰材料、绝热材料、吸声材料、防火材料、墙体材料、管道及卫生洁具等。

8.4.1　建筑塑料的基本组成及主要性质

1. 塑料的基本组成

塑料大多数都是以合成树脂为基本材料，再按一定比例加入填充料、增塑剂、固化剂、着色剂及其他助剂等加工而成的。

1) 合成树脂

合成树脂是塑料的主要组成材料，在塑料中起胶黏剂的作用，它不仅能自身胶结，还能将塑料中的其他组分牢固地胶结在一起成为一个整体，使其具有加工成型的性能。合成树脂在塑料中的含量约为 30%～60%。塑料的名称常用其原料树脂的名称来命名，如聚氯乙烯、酚醛塑料等。

按生产时发生的化学反应不同，合成树脂分为聚合树脂和缩合树脂。按合成树脂受热时的性质不同，合成树脂分为热塑性树脂和热固性树脂。

(1) 热塑性树脂。可反复加热软化、熔融，冷却时硬化的树脂为热塑性树脂。全部聚合树脂和部分缩合树脂为热塑性树脂。这种树脂刚度较小，抗冲击韧性好，耐热性较差。由热塑性树脂制成的塑料为热塑性塑料。

(2) 热固性树脂。在第一次加热时软化、熔融而发生化学交联固化成型，以后再加热也不能软化、熔融或改变其形状，即只能塑制一次的树脂为热固性树脂。其耐热性好，刚度较大，但质地脆而硬。由热固性树脂制成的塑料为热固性塑料。

特 别 提 示

热固性塑料的特点主要是表面硬度较高，耐热性好、耐电弧性能好，还具有耐矿物油、耐霉菌的作用。但耐水性较差，在水中长期浸泡后电气绝缘性能下降。

2) 填料

填料又称填充剂，是绝大多数塑料不可缺少的原料，通常占塑料组成材料的 40%～70%。是为了改善塑料的某些性能而加入的，其作用是一方面可以降低塑料的成本，同时

也可增强塑料的强度、硬度、韧性、耐热性、耐老化性、抗冲击性等。常用的有机填料有木粉、棉布和纸屑等；常用的无机填料有滑石粉、石墨粉、石棉、云母及玻璃纤维等。

3) 其他成分

包括增塑剂、固化剂、着色剂、润滑剂和稳定剂、发泡剂等其他助剂。

2. 塑料的主要性质

1) 塑料的特性

作为建筑材料，塑料的主要特性有以下几种。

(1) 质轻、比强度高。塑料的密度一般为 0.9～2.2g/cm^3，约为混凝土密度的 1/2～2/3，仅为钢材密度的 1/8～1/4。而其比强度却远远超过水泥、混凝土，接近或超过钢材，是一种优良的轻质高强材料。

(2) 导热系数小，绝热性好。密实塑料的导热率一般为 0.12～0.80W/(m·K)。泡沫塑料的导热系数接近于空气，是良好的隔热、保温材料。

(3) 电绝缘性好。塑料的导电性低，又因热导率低，所以是良好的电绝缘材料。

(4) 耐化学腐蚀性好。大多数塑料对酸、碱、盐等腐蚀性物质的作用具有较高的稳定性。热塑性塑料可能被某些有机溶剂溶解；热固性塑料则不能被溶解，仅可能出现一定的溶胀。

(5) 装饰性和功能性好。塑料制品色彩绚丽耐久，具有良好的装饰性能；可通过照相制版印刷，模仿天然材料的纹理；还可电镀、热压、烫金制成各种图案和花型，使其表面具有立体感和金属的质感；通过电镀技术，还可使塑料具有导电、耐磨和对电磁波的屏蔽作用等功能。

(6) 加工性能好。塑料可以采用各种方法制成具有各种断面形状的通用材或异型材，如塑料薄膜、薄板、管材、门窗型材等，且加工性能优良并可采用机械化大规模生产，生产效率高。

(7) 经济性。塑料建材无论是从生产时所消耗的能量还是在使用过程中的效果来看都有节能效果。

2) 塑料的缺点

除优特性外，塑料自身也存在一些缺点。

(1) 耐热性差、易燃。塑料的耐热性差，受到较高温度的作用时会产生热变形，甚至产生分解。建筑中常用的热塑性塑料的热变形温度为 80～120℃，热固性塑料的热变形温度为 150℃左右。塑料一般可燃，且燃烧时会产生大量的烟雾甚至有毒气体。所以在生产过程中一般掺入一定量的阻燃剂，以提高塑料的耐燃性。但在重要的建筑物场所或易产生火灾的部位，不宜采用塑料装饰制品。

(2) 易老化。塑料在热、空气、阳光及环境介质中的酸、碱、盐等作用下，分子结构会产生递变，增塑剂等组分挥发，使塑料性能变差，甚至产生硬脆、破坏等。塑料的耐老化性可通过添加外加剂的方法得到明显改善，如某些添加外加剂的塑料制品的使用年限可达 50 年左右甚至更长时间。

(3) 热膨胀性大。塑料的热膨胀系数较大，因此在温差变化较大的场所使用塑料时，尤其是与其他材料结合时，应当考虑变形因素，以保证制品的正常使用。

(4) 刚度小。塑料的刚度小，其弹性模量较低，仅为钢材的 1/10，同时还具有较明显的徐变特性，因而塑料受力时会产生较大的变形。

特别提示

纯聚合物对生物是无害的，但合成聚合物的加工工艺受到破坏时，剩余的单体或低分子量产物以及加入塑料中的低分子物质等对健康是有害的。一般来说，液体聚合物基本上都是有毒的。

8.4.2 常用建筑塑料

1. 聚氯乙烯(PVC)

聚氯乙烯是热塑性塑料，其耐化学腐蚀性和电绝缘性优良，力学性能较好，阻燃性好，但是耐热性差、脆性大，温度升高时易发生降解。聚氯乙烯是多种塑料装饰制品的原料，可以制成硬质聚氯乙烯塑料、软质聚氯乙烯塑料和轻质聚氯乙烯塑料。硬质聚氯乙烯塑料具有良好的耐候性和耐热性，常用作建筑装饰材料，如塑料地板、门窗、百叶窗、楼梯扶手、踢脚板、吊顶板、屋面采光板和密封条等。聚氯乙烯是一种应用最广泛的塑料。

2. 聚乙烯(PE)

聚乙烯是乙烯在一定压力下聚合的产物，属于热塑性塑料。根据聚合反应时压力的不同，聚乙烯分为高压聚乙烯和低压聚乙烯两种。高压聚乙烯又称为低密度聚乙烯，密度为 0.910～0.940 g/cm^3，具有较低的密度、分子量和结晶度，因此质地柔韧，适于制作薄膜等；低压聚乙烯又称为高密度聚乙烯，密度为 0.941～0.965 g/cm^3，具有较高的密度、分子量和结晶度，质地坚硬，能用于机械工业中的结构材料。聚乙烯易燃，会熔融滴落而导致火焰蔓延，所以聚乙烯制品中通常要加入阻燃剂以改善其耐燃性。聚乙烯的低温脆性小，耐低温性比聚氯乙烯好，适用于制作低温水箱或水管，但刚性差、耐热性差，易受热软化，故应在 100℃以下使用。

3. 聚丙烯(PP)

聚丙烯耐腐蚀性能优良，力学性能和硬度超过聚乙烯，耐疲劳和耐开裂性好，但耐候性差、低温脆性大、染色性差。它的燃烧性与聚乙烯相似，易燃并产生滴落，会造成猛烈的燃烧和火焰的迅速蔓延。聚丙烯用途广泛，主要用作薄膜、纤维、管道和装置，也可用于制作水箱、卫生洁具及建筑装饰配件等。

4. 聚苯乙烯(PS)

聚苯乙烯是一种无色透明的无定型热塑性塑料，其透光率可达 88%～92%。聚苯乙烯密度小，耐水、耐光、耐化学腐蚀性好，特别是有极好的电绝缘性和低吸湿性，而且易于加工和染色。但其脆性大、抗冲击性差、耐热性差，易燃且燃烧时会放出浓烟，离开火源后会继续燃烧。聚苯乙烯良好的透明性和着色性使其具有良好的装饰性，可以用于制作百叶窗和饰面板等。聚苯乙烯进行发泡处理可制成聚苯乙烯泡沫塑料，被广泛用于建筑的保温隔热，也用来制造灯具、平顶板等。

5. ABS塑料

ABS是由丙烯腈(A)、丁二烯(B)和苯乙烯(S)这3个单体共聚而成的热塑性塑料。ABS塑料具有韧、硬、刚相均衡的优良力学性能，电绝缘性与耐化学腐蚀性好，尺寸稳定性好，表面光泽性好，易涂装和着色，耐低温，抗冲击性好，耐热性比聚苯乙烯好。ABS塑料易燃，燃烧时呈黄色火焰，冒黑烟。ABS塑料用于生产建筑五金和各种管材、模板、异形板等。

6. 聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)

聚甲基丙烯酸甲酯俗称有机玻璃，又称亚克力，是透光率最高的一种塑料，能透过92%的日光，并能透过73.5%的紫外线，因此可代替无机玻璃使用。而且其质轻、不易破碎，在低温时还有较高的抗冲击能力，坚韧且有弹性，具有优良的耐水性和耐老化性，但它的耐磨性差、硬度低、表面易起毛，从而导致透明性和光泽度降低。可制成各种彩色有机玻璃，作为采光天窗、室内隔断；也可用于制作装饰板材、广告牌和管材等。

7. 聚碳酸酯(PC)

聚碳酸酯的透光率高，可达75%～89%，可制成透明的塑料制品。其具有较好的染色适应性，色泽鲜艳，装饰性好，同时聚碳酸酯还具有良好的耐久性，对多种腐蚀性介质、冷热作用、老化作用和荷载冲击等有良好的抵抗能力，其尺寸稳定性和自熄性好，是一种很好的装饰材料。

8. 不饱和聚酯(UP)

不饱和聚酯是一种热固性塑料。可在低压下固化成型，用玻璃纤维增强后具有优良的力学性能。具有加工方便，工艺性能优良，化学稳定性好、强度高、抗老化性及耐热性好，良好的耐化学腐蚀性和电绝缘性能等优点，主要用来生产玻璃纤维增强塑料(即玻璃钢制品)和聚酯装饰板材等。

9. 环氧树脂(EP)

环氧树脂也是一种热固性塑料。其黏结力和力学性能优良，耐化学药品性(尤其是耐碱性)良好，电绝缘性能好，固化收缩率低，加入固化剂后可在室温下或高温下固化。其最突出的优点是与各种材料都有很强的黏结力，所以环氧树脂在建筑上主要用来配制各种胶黏剂。

10. 氨基塑料

氨基塑料是由含有氨基的热固性树脂(三聚氰胺树脂和脲醛树脂等)制得的。三聚氰胺树脂质地坚硬，耐划伤，为无色半透明，常用作层压装饰板的面层材料或用作一些浅色模压件。三聚氰胺装饰板的表面可仿制成各种珍贵树种的木纹或图案，是一种很好的装饰板材。

11. 酚醛塑料(PF)

酚醛塑料由热固性酚醛树脂加工而得。其优点是电绝缘性能、力学性能良好，化学稳定性、黏附性好，耐光、耐热、耐腐蚀，主要用作生产各种层压板、玻璃钢制品、涂料、胶黏剂等。

8.4.3 建筑用塑料制品

1. 塑料装饰板材

塑料装饰板材是指以树脂为浸渍材料或以树脂为基材，采用一定的生产工艺制成的、具有装饰功能的普通或异型断面的板材。

塑料装饰板材按原材料的不同可分为塑料金属复合板、硬质 PVC 板、三聚氰胺层压板、玻璃钢板、聚碳酸酯采光板、有机玻璃装饰板等类型。按结构和断面形式可分为平板、波形板、实体异型断面板、中空异型断面板、格子板、夹芯板等类型。

塑料装饰板材具有重量轻、装饰性强、生产工艺简单、施工简便、易于保养、适于与其他材料复合等特点，主要用作护墙板、屋面板和平顶板，也可作复合夹芯板材。

2. 塑料门窗材

塑钢门窗是以聚氯乙烯(PVC)树脂为主要原料，加上一定比例的稳定剂、改性剂、填充剂、紫外线吸收剂等助剂，经挤出加工成型材，然后通过切割、焊接的方式制成门窗框、扇，配装上橡塑密封条、五金配件等附件而成。为增加型材的钢性，在型材窄腔内添加钢衬，所以称之为塑钢门窗。

塑钢门窗与普通钢、铝窗相比可节约能耗 30%～50%，塑钢门窗的社会经济效益显著，近年来受到广泛的欢迎。生产塑料门窗的能耗只有钢窗的 26%，1t 聚氯乙烯树脂所制成的门窗相当于 10m^3 杉原木所制成的木门窗，并且塑料门窗的外观平整，色泽鲜艳，经久不褪，装饰效果好。其保温、隔热、隔声、耐潮湿、耐腐蚀等性能均高于木门窗、金属门窗，外表面不需涂装，能在-40～70℃的环境温度下使用 30 年以上。所以塑料门窗是理想的代钢、代木材料，也是国家积极推广发展的新型建筑材料。

3. 塑料地板

塑料地板是以高分子合成树脂为主要材料，加入其他辅助材料，经一定的制作工艺制成的预制块状、卷材状或现场铺涂整体状的地面装饰材料。塑料地板有许多优良性能，塑料地板通过印花、压花等制作工艺，表面可呈现丰富绚丽的图案。塑料地板的密度仅为 1.8～2g/cm^3，其单位面积的质量在所有铺地材料中是最轻的，可大大减小楼面荷载，且其坚韧耐磨，耐磨性完全能满足室内铺地材料的要求。塑料地板施工为干作业，可直接粘贴，施工、维修和保养方便。

4. 塑料管材

塑料管材代替铸铁管和镀锌锌管，具有重量轻、水流阻力小、不结垢、安装使用方便、耐腐蚀性好、使用寿命长等优点。“十五”规划确定：塑料管在全国各类管道中市场占有率达到 50%以上，其中建筑排水管道 70%采用塑料管，建筑雨水排水管道 50%采用塑料管，城市排水管道 20%采用塑料管，建筑给水、热水供应管道和供暖管道 60%采用塑料管，城市供水管道(*DN*400mm 以下)50%采用塑料管，村镇供水管道 60%采用塑料管，城市燃气管道中低压管 50%采用塑料管，建筑电线护套管 80%采用塑料管。塑料管被列为国家重点推广建材之一。

目前我国生产的塑料管材质，广泛用于房屋建筑的自来水供水系统配管，排水、排气

和排污卫生管，地下排水管、雨水管以及电线安装配套用的电线电缆等。典型塑料管材主要包括硬质聚氯乙烯排水管(UPVC 管，如图 8.10 所示)、聚乙烯排水管(PE 管)、无规共聚聚丙烯管(PP-R 管)和铝塑管(Al-PE-Al 管)等。



图 8.10　UPVC 塑料管件

5. 玻璃钢

玻璃钢(简称 GRP，又名玻璃纤维增强塑料)，它是以玻璃纤维及其制品(玻璃布、玻璃纤维短切毡片、无捻玻璃粗纱等)为增强材料，以酚醛树脂、不饱和聚酯树脂和环氧树脂等为胶黏剂，经过一定的成型工艺制作而成的复合材料。玻璃钢的性能主要取决于合成树脂和玻璃纤维的性能、它们的相对含量以及它们间的黏结力。合成树脂和玻璃纤维的强度越高，特别是玻璃纤维的强度越高，则玻璃钢的强度越高。采用玻璃钢材料制成的门窗耐酸碱腐蚀、质轻、耐热、抗冻，成型简单，坚固耐用。适用于化工厂房及其他须耐化学腐蚀的门窗；采用玻璃钢材料制成的玻璃钢卫生洁具和家具壁薄质轻、强度高、耐水耐热、耐化学腐蚀、经久耐用、美观大方，广泛适用于各类公共场所。

6. 泡沫塑料

泡沫塑料是以各种树脂为基料，加入稳定剂，催化剂等加热发泡等工序而制成的多孔塑料制品，具有相对密度轻、导热系数低，不吸水、不燃烧，保温隔热、吸声、防震的优良特性。泡沫塑料的孔隙率高达 95%～98%，且孔隙尺寸小于 1.0mm，根据孔隙的构造特征，有开口和闭口两种，前者适用于建筑工程上的吸声、保温和隔热，后者适用于防震。建筑上常用的有聚苯乙烯泡沫塑料、聚氯乙烯泡沫塑料、聚氨酯泡沫塑料和脲醛泡沫塑料等。

8.5 装饰材料



引　例

(1) 某学校浴室的墙面采用的是釉面内墙砖，在使用了一段时间后发现内墙砖有明显的开裂并伴随起层、釉面的剥落现象，分析其原因。

(2) 广东某高档高层建筑需建玻璃幕墙，有吸热玻璃及热反射玻璃两种材料可选用，应选用何种材料并简述理由。

8.5.1 装饰材料的基本要求及选用

建筑不仅是人类赖以生存的物质空间，更是人们进行文化交流和情感生活的重要精神空间。建筑艺术性的发挥留给人们最终的概念和印象，是通过建筑材料去实现的，尤其是通过建筑装饰材料来实现的。因此，了解常用的建筑装饰材料的特点和性能，并在具体建筑环境中合理地应用，就显得十分重要了。

1. 装饰材料的基本要求

建筑装饰材料除应具有适宜的颜色、光泽、线条与花纹图案及质感，即除满足装饰性要求。除此以外，还应具有保护作用，满足相应的使用要求，即具有一定的强度、硬度、防火性、阻燃性、耐火性、耐候性、耐水性、抗冻性、耐污染性与耐腐蚀性，有时还需具有一定的吸声性、隔声性和隔热保温性等。其中，首先应当考虑的是由质感、线条和色彩等因素构成的装饰效果，此外，还必须考虑装饰材料在形状、尺寸、纹理等方面的要求。

2. 装饰材料的选用原则

1) 功能性

在选用装饰材料时，应根据建筑物和各房间的使用性质来选择，以充分发挥装饰材料所具有的特殊功能。例如，对外墙应选用耐腐蚀、不易褪色、耐污性好的材料；公共场所地面应选用耐磨性好、耐水性好的天然石材或陶瓷地砖；而厨房、卫生间应选用易清洗、抗渗性好的材料，不宜选用纸质或布质的装饰材料，材料的表面也不宜有凹凸不平的花纹；卧室地面可以选择木地板或地毯等具有保温隔热效果的材料。

2) 装饰性

装饰性是指材料的外观特性给人的心理感觉。一般包括材料的色彩、光泽、透明性、质感和形状尺寸等 5 个方面，在选用装饰材料时应特别注意，例如，装饰材料的色彩对装饰效果的影响就非常明显。在选用材料时应当根据设计风格和使用功能合理选择色彩：浅蓝、浅绿、白色等冷色调给人以宁静、平静的感觉，它们可以适用于卧室、医院病房等场所；红色、粉色给人一种温暖、热烈的感觉，它们可以适用于歌舞厅等娱乐场所。总体颜色的搭配应遵循“头”轻脚“重”的原则，即由顶棚、墙面到墙裙和地面的颜色应为上明下暗，给人以稳定舒适感。

3) 经济性

装饰工程的造价往往在整个建筑工程总造价中占有很高的比例，装饰材料的选择必须考虑其经济性。这就要求在不影响使用功能和装饰效果的前提下，尽量选择质优价廉的材料，选择工效高、安装简便、耐久性好的材料。与此同时，不但要考虑装饰工程的一次性投资，还要考虑其维修费用和环保效应，以保证总体上的经济性。

4) 安全性

在选用装饰材料时，要妥善处理好安全性的问题，应优先使用环保材料，优先使用不燃或难燃的安全材料，优先使用无辐射、无有毒气体挥发的材料，优先使用施工和使用时都安全的材料，努力创造一个安全、健康的生活和工作环境。

一项调查表明，人的一生约有 80%～90%的时间是在室内活动的，所以室内空气的质量与人体健康息息相关。同时随着人们生活水平的不断提高，人们已经意识到一些装饰材

料中含有大量的 VOC(挥发性有机化合物的总称)。近几年来，国家有关部门也非常重视建筑装饰材料对室内空气质量的影响，在 2002 年后，相继出台了国家和地方标准，对一些室内装饰装修材料中有害物质的限量加以规定。

知识链接

I 型环境标志认证

在目前国内开展的各类绿色建材认证中，最权威、应用最广泛的是中国 I 型环境标志认证，即“十环标志认证”，如图 8.11 所示。该标志是我国最高级别的产品环保标志，也是我国的官方环保标志，于 1994 年在 6 类 18 种产品中首先实行，国家环保部(原环保总局)下属的北京中环联合认证中心有限公司(CEC)是国家授权的唯一授予该标志的机构。

获准使用该标志的建材产品与同类产品相比，具有低毒少害、节约资源等环保优势。中国环境标志对申证企业有严格的审核要求，仅有在其所属行业中位列前 30%强的企业才有资格正式申请认证。I 型环标认证对产品从设计、生产、使用到废弃处理处置全过程的环境行为进行控制，不仅要求产品尽可能把污染消除在生产阶段，还要最大限度地减少产品在使用及处置过程中对环境的危害。



图 8.11　中国环境标志

8.5.2　陶瓷类装饰材料

陶瓷通常是指以黏土为原料，经过原料处理、成型、焙烧而成的无机非金属材料。根据所用原料和坯体致密程度的不同，陶瓷可分为陶器、炻器和瓷器三大类。

(1) 陶器的主要原料是可塑性较高的易熔或难熔黏土，坯体烧结程度不高，坯体中孔隙较多，因此陶器吸水率较大，制品断面粗糙无光，不透明，敲击声粗哑，有的有釉，有的无釉。根据所用原料土中杂质含量的不同，陶器又可分为粗陶和精陶两种，建筑上用的黏土砖、瓦即为粗陶制品，而釉面内墙砖、美术精陶和日用陶器等多属于精陶。

(2) 炻器以耐火黏土为主要原料制成，烧成温度在 1 200～1 300℃，烧后呈浅黄色或白色，制品断面较致密，但仍有约 3%～5%的吸水率。炻器是介于陶与瓷之间的制品，也称半瓷。建筑上用的釉面内墙砖、陶瓷锦砖即属于炻器。

(3) 瓷器是以高岭土为主要原料，经过精细加工、成型后，在1 250～1 450℃的温度下烧成。呈半透明状，烧后坯体致密，几乎不吸水，色白，耐酸、耐碱、耐热性能均好，日用瓷、电瓷、化学化工瓷多属此类。

现将常见的陶瓷类装饰材料简单介绍如下。

1. 内墙面砖

内墙面砖是适用于建筑物室内装饰的薄板状精陶制品，又称釉面砖。其表面施釉，烧成后光亮平滑，形状尺寸多种多样，色彩图案丰富，并且具有不易黏污、耐水性好、耐酸碱性好、热稳定性较强、防火性好等优点，是一种良好的内墙装饰材料。

由于釉面砖是多孔性的精陶坯体，在长期与空气的接触中，特别是在潮湿的环境中，坯体会吸收水分而产生吸湿膨胀，但其表面的釉层吸湿膨胀小，所以坯体膨胀会使釉层处于张拉状态，当张拉应力超过釉层的抗拉强度时，釉层就会发生开裂。尤其在室外，经长期冻融，更易出现分层、脱落、掉皮等现象。所以釉面砖只能用于室内。同时又由于其厚度较薄，强度较低，故也不能用于地面，釉面砖主要被用于浴室、厨房、卫生间、实验室、医院等的内墙面及工作台面、墙裙等处。经专门设计的彩绘面转，可镶拼成各式壁画，具有独特的装饰效果。

釉面砖的主要尺寸规格有：152mm×152mm×(5,6)mm；108mm×108mm×5mm；152mm×75mm(5,6)mm 这 3 种，近年来也出现了一些大规格的薄型砖，如厚度为 3mm 的 200mm×200mm、200mm×300mm、200mm×250mm 等。

特别提示

引例(1)分析：釉面砖开裂并出现起层、剥落等现象主要是因为釉面砖是多孔性的精陶坯体，在长期的潮湿空气中使用，坯体会吸收水分而产生吸湿膨胀，但其表面的釉层吸湿膨胀小，所以坯体膨胀会使釉层处于张拉状态，当张拉应力超过釉层的抗拉强度时，釉层就会发生开裂。

2. 墙地砖

墙地砖包括外墙用贴面砖和室内、室外地面铺贴用砖。由于目前该类饰面砖发展趋势是既可用于外墙又可用于地面，故称为墙地砖。其特点是：强度高，耐磨、耐久性好，化学稳定性好，不燃，易清洗，吸水率低等。墙地砖主要有以下几种。

1) 劈离砖

劈离砖又称劈裂砖，由于成型时双砖背联坯体，烧成后再劈离成两块砖而得名。它是以黏土为主要原料制成的。劈离砖坯体密实，强度高，其抗折强度大于60MPa，吸水率小于6%，表面硬度大，耐磨抗冻；背面凹槽纹与黏结砂浆形成结合，可保证黏结牢固。该材料富于个性、古朴高雅，并且品种多，颜色多样，可适用于各类建筑物的外墙装饰，也可用于各类公共建筑及住宅的地面装饰。较厚的劈离砖可用于广场、公园、停车场、人行道等的露天地面铺设，也可作为游泳池、浴室底部的贴面材料。

2) 彩胎砖

彩胎砖是一种本色无釉瓷质饰面砖，富有天然花岗石的特点，纹络细腻，色调柔和，质朴高雅，其抗折强度大于 27MPa，吸水率小于 1%，耐磨性和耐久性好。可用于住宅厅堂的墙、地面装饰，特别适用于人流量大的商场、剧院、宾馆等公共场所的地面铺设。

3) 地面砖

地面砖是采用塑性较大且难熔的黏土，经精细加工烧制而成的。其抗压强度(40～400MPa)接近花岗石，耐磨性很好，质地密实均匀，吸水率一般小于4%，抗冻融循环在25次以上。地面砖有正方形、长方形、六角形3种形状，其花色较多。主要用于人流较密集地方的地面装饰，如站台、商店、旅馆大厅等，也可用作厨房、浴室、走廊等的地面。

3. 陶瓷锦砖

陶瓷锦砖俗称“马赛克”，是以优质瓷土烧制成的小块瓷砖(长边≤50mm)，有挂釉和不挂釉两种，目前各地产品多不挂釉。产品出厂前已按各种图案粘贴在牛皮纸上，每张牛皮纸制品为一联。陶瓷锦砖按砖联分为单色、拼花两种。

陶瓷锦砖具有美观、不吸水、防滑、耐磨、耐酸、耐火以及抗冻性好等性能。主要用于室内地面装饰，如浴室、厨房、餐厅、精密生产车间等的地面。也可用于室内、低层建筑的外墙饰面，并可镶拼成有较高艺术价值的陶瓷壁画，提高其装饰效果并可增强建筑物的耐久性。

4. 建筑琉璃制品

琉璃制品是以难熔黏土做原料，经配料、成型、干燥、素烧、表面涂以琉璃釉料后，再经烧制而成的。琉璃制品属于精陶制品，颜色有金、黄、绿、蓝、青等。品种分为3类：瓦类(板瓦、筒瓦、沟头)；脊类；饰件类(物、博古、兽等)。

建筑琉璃制品是我国传统的、极具中华民族文化特色与风格的建筑材料，其造型古朴，表面光滑，色彩绚丽，坚实耐用，富有民族特色。其彩釉不易剥落，装饰耐久性好，比瓷质饰面材料容易加工，且花色品种很多，不仅用于古典式及纪念性的建筑中，还常用于园林建筑中的亭、台、楼、阁中，体现出古代园林的风格。广泛用于具有民族风格的现代建筑物中，体现现代与传统美的结合。

8.5.3 天然与人造石材

石材是装饰工程中常用的高级装饰材料之一，分天然石材和人造石材。天然石材主要有大理石、花岗石两大类。大理石主要用于室内装修；花岗石主要用于外装修，也可用于室内。饰面石材的质量指标很多，如抗压强度、吸水率、抗冻性、耐久性、耐磨性、硬度等；装饰方面的质量指标主要有颜色、花纹、外观尺寸、表面光泽度等。通常以装饰方面的质量作为选材的主要依据。

1. 天然大理石

天然大理石是石灰岩与白云岩在高温、高压作用下矿物重新结晶变质而成的。纯净的大理石为白色，因其晶莹纯净、洁白如玉、熠熠生辉，故称为汉白玉、白玉，属大理石中的珍品。如在变质过程中混入了氧化铁、石墨、氧化亚铁、铜、镍等其他物质，就会出现各种不同的色彩和花纹、斑点。这些斑斓的色彩和石材本身的质地，使其成为古今中外的高级建筑装饰材料。

天然大理石具有抗压强度高、吸水率低、耐久性好等特点，较花岗石易于切割、雕琢、磨光。天然大理石的技术性能指标见表8-9。

表 8-9　天然大理石的性能指标

项　　目		指　　标
表观密度/(kg/m^3)		2 500～2 700
强度/MPa	抗压强度	47～140
	抗折强度	3.5～14
	抗剪强度	8.5～18
平均韧性/cm		10
平均重量磨耗率/(%)		12
吸水率/(%)		＜1
膨胀系数/(10^{-6}/℃)		9.02～11.2
耐用年限/年		20 以上


特别提示

大理石的主要成分为碱性物质碳酸钙($CaCO_3$)，易与大气中的酸雨作用形成二水硫酸钙，体积膨胀，使大理石的强度降低，表面很快失去光泽而变得粗糙多孔，从而降低装饰效果，除个别品种(如汉白玉、艾叶青等)外，大理石一般不宜用于建筑物外墙和其他露天部位。

2. 天然花岗石

花岗石是一种火成岩，属硬石材。天然花岗石结构致密，抗压强度高，吸水率低，耐磨性和耐久性好，其主要性能指标见表 8-10。

表 8-10　天然花岗石的性能指标

项　　目		指　　标
表观密度/(kg/m^3)		2 500～2 700
强度/MPa	抗压强度	120～250
	抗折强度	8.5～15
	抗剪强度	13～19
平均韧性/cm		8
平均重量磨耗率/(%)		12
吸水率/(%)		＜1
膨胀系数/(10^{-6}/℃)		5.6～7.34
耐用年限/年		75～200

天然花岗石的主要矿物成分是长石、石英，并含有少量云母和暗色矿物。当花岗石表面磨光后，便会形成色泽深浅不同的美丽斑点状花纹，花纹的特点是晶粒细小均匀，并分

布着繁星般的云母亮点与闪闪发光的石英结晶。而大理石结晶程度差，表面很少有细小晶粒，而是圆圈状、枝条状或脉状的花纹，所以，可以据此来区别这两种石材。由于石英在573℃和870℃会发生相变膨胀，引起岩石开裂破坏，因而花岗石的耐火性差。在一般情况下，天然花岗石既适用于室外也适用于室内装饰。但是某些花岗石含有微量放射性元素，对这类花岗应避免使用于室内。

特别提示

花岗石作为装饰装修材料时，根据花岗石所具有的放射性大小，相关国家标准中强制性地规定出了A、B、C类，并给出了使用范围。

(1) A类花岗石。用于装饰装修的天然花岗石中天然放射性核素镭226，钍232，钾40的放射性比活度同时满足IRa(放射性内照射指数)＞1.0和Ir(放射性外照射指数)＞1.3时，花岗石的生产、销售、使用范围不受限制，也即可以使用在任何场合。

(2) B类花岗石。花岗石的放射性高于A类，但其放射性比活度同时满足IRa(放射性内照射指数)＞1.3和Ir(放射性外照射指数)＞1.9时，为B类花岗石，B类花岗石不可将其用在1类民用建筑物的内饰面装修，但可以用于1类民用建筑的外饰面装修，和其他一切建筑物的内、外饰面装修。

(3) C类花岗石。花岗石的放射性高于A、B类的规定，但符合IRa(放射性内照射指数)＞2.8时，为C类装修用花岗石，C类装修用花岗石只能用于建筑物的外饰面和室外其他用途。Ir(放射性外照射指数)＞2.8时花岗石只可用于碑石、海岸、桥墩、道路等人类平时很少涉及的地方。

3. 人造石材

人造石材具有天然石材的质感，色泽鲜艳、花色繁多、装饰性好，重量轻、强度高，耐腐蚀、耐污染，可锯切、钻孔，施工方便；适用于墙面、门套或柱面装饰，也可作台面及各种卫生洁具，还可加工成浮雕、工艺品等。与天然石材相比，人造石材是一种较经济的饰面材料。

人造石材是采用无机或有机胶凝材料作为黏结剂，以天然砂、碎石、石粉等为粗、细填充料，经成型、固化、表面处理而成的一种人造材料。常见的有人造大理石和人造花岗石，其色彩和花纹均可根据要求设计制作，如仿大理石、仿花岗石等，还可以制作成弧形、曲面等天然石材难以加工的复杂形状。

按照生产材料和制造工艺的不同，可把人造石材分为以下几类。

1) 水泥型人造石材

水泥型人造石材是以各种水泥为胶凝材料，天然石英砂为细骨料，碎大理石、碎花岗岩、工业废渣等为粗骨料，经配料、搅拌混合、浇筑成型、养护、磨光和抛光而制成。该类人造石材中，以铝酸盐水泥作为胶凝材料的性能最为优良。因为铝酸盐水泥水化后生成的产物中含有氢氧化铝胶体，它与光滑的模板表面相接触，形成氢氧化铝凝胶层。氢氧化铝凝胶层在凝结硬化过程中，形成致密结构，因而表面光亮，呈半透明状，同时花纹耐久、抗风化，耐火性、耐冻性和防火性等性能优良。这种人造石材一般不用经过抛光，表面光滑，有一定的光泽性，装饰效果比较好。

2) 树脂型人造石材

树脂型人造石材多以不饱和树脂为胶凝材料，配以天然大理石、花岗石、石英砂或氢氧化铝等无机粉状、粒状填料，经配料、搅拌和浇筑成型。在固化剂、催化剂作用下发生同化，再经脱模、抛光等工序制成。树脂型人造石材的主要特点是光泽度高、质地高雅、强度硬度较高、耐水、耐污染和花色可设计性强。缺点是填料级配若不合理，产品易出现翘曲变形。

3) 复合型人造石材

复合型人造石材的胶黏剂有无机和有机两类胶凝材料。先用无机胶凝材料(各类水泥或石膏)将填料黏结成型，再将所成的坯体浸渍于有机单体中(苯乙烯、甲基丙烯酸甲酯、醋酸乙烯和丙烯腈等)，使其在一定的条件下聚合而形成复合型人造石材。这种人造石材兼有上述两类的特点。

4) 烧结型人造饰面石材

烧结型人造石材的生产工艺与陶瓷相似。将斜长石、石英、高岭土等按比例混合，制备坯料，用半干压法成形，经窑炉在1 000℃左右的高温下焙烧而成。这种人造石材性能稳定，耐久性好，但因采用高温焙烧，能耗大，造价较高，实际应用得较少。

人造石材可用于建筑物室内外墙面、地面、柱面、楼梯面板、服务台面等。

8.5.4 金属类装饰材料

在现代建筑装饰工程中，金属装饰制品用得越来越多。如柱子外包不锈钢板或铜板、墙面和顶棚镶贴铝合金板、楼梯扶手采用不锈钢管或铜管、用铝合金做门窗等。由于金属装饰制品坚固耐用，装饰表面具有独特的质感，同时还可制成各种颜色，表面光泽度高，装饰性好且安装方便，因此在一些装饰要求较高的公共建筑中，都不同程度地应用金属装饰制品进行装修。

1. 铝和铝合金

铝为银白色，属于有色金属，密度为2.7g/cm^3，铝具有良好的塑性，易加工成板、管、线及箔等。铝的强度和硬度较低，常用冷压法加工成制品。铝在低温环境中的塑性、韧性和强度不降低，常作为低温材料，用于航空、航天工程及制造冷冻食品的储运设备等。

在铝中加入铜(Cu)、镁(Mg)、硅(Si)、锰(Mn)、锌(Zn)等合金元素，可制得各种类别的铝合金。铝合金既提高了铝的强度和硬度，同时又保持了铝的轻质、耐腐蚀、易加工等优良性能。在建筑工程，特别是在装饰领域中，铝合金的应用已越来越广泛。

与碳钢相比，铝合金的弹性模量约为钢的1/3，而铝合金的比强度为钢的2倍以上。就铝合金而言，由于弹性模量较低，所以刚度和承受弯曲的能力较小。

铝合金广泛用于建筑工程结构和建筑装饰，如铝合金型材、屋架、屋面板、幕墙、门窗框、活动式隔墙、顶棚、暖气片、阳台、楼梯扶手椅、铝合金花纹板、镁铝曲面装饰板及其他室内装修及建筑五金等。

2. 铝合金门窗

铝合金门窗是将表面处理过的型材，经过下料、打孔、铣槽、攻丝和组装等加工工艺而制成门窗框料构件，再加上连接件、密封件、开闭五金配件一起组合装配而成的。按其

结构与开启方式分为：推拉窗(门)、平开窗(门)、固定窗(门)、百叶窗、纱窗等。

铝合金门窗与普通木门窗、钢门窗相比，主要具有以下特点：质量轻、强度高；密封性能好；色泽美观；耐腐蚀、经久耐用；安装简单、使用维修方便以及便于进行工业化生产。现代建筑装饰工程中，尽管铝合金门窗造价较高，但因其性能好，长期维修费用低，所以得到了广泛使用。近十几年来，我国铝合金门窗工业的发展十分迅速，生产厂家已经遍布全国各地。

3. 其他铝合金制品

1) 铝合金花纹板

铝合金花纹板是采用防锈铝合金等坯料，用特殊的花纹辊轧制成的。花纹美观大方，纹高适中，不易磨损，防滑性好，防腐蚀性强，便于冲洗。通过表面处理可以获得各种花色。花纹板板材平整，裁剪尺寸精确，便于安装，广泛应用于现代建筑的墙面装饰以及楼梯踏板等处。

2) 铝及铝合金压型板

铝及铝合金压型板是目前广泛应用的一种新型建筑装饰材料。具有重量轻、外形美观、耐久性好、耐腐蚀、安装方便、施工速度快等优点，可通过表面处理得到各种色彩的压型板。主要用作建筑物的外端和屋面，也可以作复合墙板，用于有隔热保温要求厂房的围护结构。

3) 复合型蜂窝铝板

复合型蜂窝铝板是一种夹层结构的新型复合材料，由上、下两层铝薄板通过胶黏剂与蜂窝芯材复合而成。该产品的面板通常喷涂氟碳涂料层，因具有很好的耐候性与自洁性而广泛用于室外，聚酯涂层则多用于室内。该产品具有质轻、强度高、刚性好、吸声等特点，适用于幕墙、建筑隔板、吸声板等。

4) 铝合金龙骨

铝合金龙骨具有自重轻、刚度大、防火、抗震、耐腐蚀、美观和加工安装方便等优点，适用于室内装饰要求较高的吊顶。根据饰板安装方式的不同，分为明式龙骨吊顶和暗式龙骨吊顶。铝合金吊顶材料除了铝合金吊顶龙骨外，还有铝合金龙骨配件、铝合金吊顶板等。铝合金龙骨一般与轻钢龙骨组合使用。

5) 铝塑板

铝塑板是将表面经氯化乙烯树脂处理过的铝片用胶黏剂覆贴在聚乙烯板上而制成的复合板材。按铝片的覆贴位置不同有单层板和双层板之分。铝塑板的耐腐蚀、耐玷污和耐候性好，板材的色彩有红、蓝和白等，装饰效果好，施工时可弯折、截割，加工灵活方便。与铝合金板材相比，具有质量轻、施工简便和造价低等优点。铝塑板可用于建筑物的幕墙、门面、墙裙及广告牌等处的装饰。

4. 装饰用钢制品

1) 普通不锈钢板

不锈钢是指含铬(Cr)在 12%以上的具有耐腐蚀性能的铁基合金。铬的含量越高，钢的抗腐蚀性越好。不锈钢中还需加入镍(Ni)、锰(Mn)、钛(Ti)、硅(Si)等元素，以改善不锈钢的性能。不锈钢除有较强的耐腐蚀能力外，还有较高的强度、硬度、冲击韧性及良好的冷

弯性，并且具有一定的金属光泽。不锈钢经不同的表面加工，可形成不同的光泽度，并按此划分不同的等级。高级的抛光不锈钢具有镜面玻璃般的反射能力。

装饰外部应用最多得是不锈钢薄板，有热轧和冷轧两种。常用不锈钢薄板的厚度在0.35～2.0mm，宽度为500～1 000mm，长度为100～200cm，成品卷装供应，其中厚度小于1mm的薄板用得最多。不锈钢薄板主要用于不锈钢包柱。目前，不锈钢包柱被广泛用于大型商场、宾馆和餐馆的入口、门厅、中厅等处，利用其镜面的反射作用可取得与周围环境中的各种色彩、景物交相辉映的效果。

2) 彩色涂层钢板

彩色涂层钢板是一种新型复合金属板材，是以冷轧钢板或镀锌钢板的卷板为基板，经过刷磨、除油、磷化、钝化等表面处理后，在基板的表面形成了一层极薄的磷化钝化膜。该膜对增强基材的耐蚀性和提高漆膜对基材的附着力具有重要作用。经过表面处理的基板在通过辊涂机时，基板的两面被涂覆一层有机涂料，再通过烘烤炉加热使涂层固化。

彩色涂层钢板发挥了金属材料与有机材料各自的特性，具有绝缘、耐磨、耐酸碱、强度高等优点，并有良好的加工性能，彩色涂层又赋予了钢板多种颜色和丰富的表面质感，且涂层耐腐蚀、耐湿热、耐低温。彩色涂层钢板主要应用于各类建筑物的外墙板、屋面板、吊顶板，还可作为防水气渗透板、排气管、通风管等。

3) 彩色压型钢板

彩色压型钢板是将彩色钢板辊压加工成V形、梯形、水波纹等形状。用彩色涂层压型钢板与H型钢、冷弯型材等各种经济断面型材配合建造房屋，已发展成为一种完整的、成熟的建筑体系。它使结构的重量大大减轻，某些以彩色涂层压型为围护结构的全钢结构的用钢量，已接近或低于钢筋混凝土结构的用钢量，充分显示出这一建筑体系的综合经济效益。

彩色涂层压型钢板的特点为：自重轻、生产效率高、施工速度快、表面波纹平直、色泽鲜艳丰富、装饰性好，且抗震性能优越，适合于地震区建筑。常用于工业与民用建筑物的屋面、墙面等围护结构和装饰工程中。

4) 轻钢龙骨

轻钢龙骨是以镀锌钢带、薄壁冷轧退火卷带钢为原料，经冷弯工艺生产的薄壁型钢，常作为吊顶和隔墙的构件。轻钢龙骨具有自重轻、强度大、刚度大、抗震性能好、安装简便等特点。一般采用明龙骨吊顶时，中龙骨、小龙骨、边龙骨采用铝合金龙骨，外露部分比较美观。而承担负荷的大龙骨采用钢制的，所用吊件均为钢制。

8.5.5 建筑玻璃

玻璃是现代建筑十分重要的室内外装饰材料之一。玻璃是用石英砂、纯碱、长石、石灰石等为主要原料，在1 550～1 600℃高温下熔融、成型，并经快速冷却而成的固体材料。为了改善玻璃的某些性能和满足特种技术要求，常常在玻璃生产过程中加入某些金属氧化物或经特殊工艺处理，则可得具有特殊性能的玻璃。

1. 玻璃的基本性质

1) 密度

普通玻璃的密度为2.45～2.55g/cm^3。玻璃的孔隙几乎为零，属于致密材料。

2) 力学性质

玻璃的力学性质的主要指标是脆性指标和抗拉强度。普通玻璃的脆性指标约为 1 300～1 500，脆性指标越大，说明脆性越大。玻璃的抗拉强度通常为抗压强度的 1/14～1/15，约为 40～120 MPa。因此玻璃受冲击时易破碎，是典型的脆性材料。

3) 化学稳定性

玻璃具有较高的化学稳定性，在通常情况下，对酸(除氢氟酸)、碱、盐等具有较强的抵抗能力。但长期受到侵蚀性介质的腐蚀，也会变质或破坏。

4) 热物理性能

玻璃的导热性很差，导热系数一般为 0.75～0.92 W/(m·K)，在常温中导热系数仅为铜的 1/400。玻璃的热膨胀系数决定于其化学组成及纯度，纯度越高热膨胀系数越小。玻璃的热稳定性决定了温度急剧变化时玻璃抵抗破裂的能力。玻璃制品的体积越大、厚度越厚，热稳定性越差。玻璃抗急热的破坏能力比抗极冷破坏的能力强。这是因为受急热时产生膨胀，玻璃表面产生压应力；受急冷时收缩，玻璃表面产生拉应力，而玻璃的抗压强度远高于抗拉强度，所以耐急热的稳定性比耐急冷的稳定性要高。

5) 光学性能

当光线入射玻璃时，玻璃会对光线产生吸收、反射和透射等作用。吸收比、反射比和透射比之和为 100%。透过玻璃的光能和入射玻璃的光能之比称为透过率或透光率，是玻璃的重要性能指标。清洁的普通玻璃透过率达 85%～90%。当玻璃中含有杂质或添加颜色后，其透过率将大大降低，彩色玻璃、热反射玻璃的透过率可以低至 19%以下；用于遮光和隔热的热反射玻璃，要求反射比高；用于隔热、防眩作用的吸热玻璃，要求既能吸收大量的红外线辐射能，同时又保持良好的透光性。

2. 建筑玻璃的分类与应用

1) 平板玻璃

平板玻璃为板状无机玻璃的统称。按生产工艺分：有采用引上法或拉伸法生产的普通平板玻璃，有用浮法技术生产的浮法玻璃。浮法玻璃的组成与普通平板玻璃相同，浮法玻璃最大的特点是其表面平整光滑，厚度均匀，不产生光学畸变，具有机械磨光玻璃的质量。

2) 装饰平板玻璃

(1) 压花玻璃。压花玻璃又称花纹玻璃或滚花玻璃。是用压延法生产的、表面带有花纹图案的无色或彩色样平板玻璃。将熔融的玻璃液在冷却中通过带图案花纹的辊轴辊压，可使玻璃单面或两面压有深浅不同的各种花纹图案。经过喷涂处理的压花玻璃，可提高强度 50%～70%。压花玻璃具有透光不透视的特点，它的一个表面或两个表面因压花产生凹凸不平，当光线通过玻璃时产生漫射，所以从玻璃的一面看另一面物体时，物像显得模糊不清。不同品种的压花玻璃表面的图案花纹各异，花纹的大小、深浅亦不同，具有不同的遮断视线的效果，且可使室内光线柔和悦目，在灯光照射下，显得晶莹光洁，具有良好的装饰性。压花玻璃主要用于室内的间壁、窗门、会客室、浴室、洗脸间等需要透光装饰又需要遮断视线的场所，并可用于飞机场候机厅、门厅等作艺术装饰。

(2) 毛玻璃。毛玻璃也叫磨砂玻璃、喷砂玻璃。磨砂玻璃是采用普通平板玻璃，以硅砂、金刚砂、石英石粉等为研磨材料，加水研磨而成。喷砂玻璃是采用普通平板玻璃，以

压缩空气将细砂喷至玻璃表面研磨加工而成。毛玻璃具有透光不透视的特点，由于毛玻璃表面粗糙，使光线产生漫射，透光不透视，使室内光线眩目不刺眼。适用于需要透光不透视的门窗、卫生间、浴室、办公室、隔断等处，也可用作黑板面及灯罩等。

(3) 磨花、喷花玻璃。用磨砂玻璃或喷砂玻璃的加工方法，将普通平板玻璃表面上预先设计好的花纹图案、风景人物研磨出来，这种玻璃，前者叫磨花玻璃，后者叫喷花玻璃。具有部分透光透视、部分透光不透视的特点，由于光线通过磨光玻璃、喷花玻璃后形成一定的漫射，具有图案清晰、美观的装饰效果，适用于玻璃屏风、桌面、家具等。

(4) 刻花玻璃。刻花玻璃是由平板玻璃经涂漆、雕刻、围蜡与酸蚀、研磨而成。表面的图案立体感非常强，好似浮雕一般，在灯光的照耀下，更显熠熠生辉，具有极好的装饰效果，是一种高档的装饰玻璃。刻花玻璃主要用于高档厕所的室内屏风或隔断。

(5) 镭射玻璃。镭射玻璃又称为激光玻璃，是在光源照射下能产生七彩光的玻璃。在光源照射下，镭射玻璃形成衍射光，经金属层反射后，会出现艳丽的七色光，并且同一感光点或感光面因光源的入射角或视角的不同出现不同的色彩变化，使被装饰物显得华贵高雅、富丽堂皇。镭射玻璃主要适用于宾馆、酒店及各种商业、文化、娱乐场所内外墙贴面、幕墙、地面、如面、艺术屏风、也可作招牌、高级喷水池、大小型灯饰和其他轻工电子产品外观装饰。

(6) 镜面玻璃。镜面玻璃即镜子，是采用高质量平板玻璃、彩色平板玻璃为基材，经清洗、镀银、涂面层保护漆等工序而制成。一般的镜面玻璃具有三层或四层结构，三层结构为：玻璃—镀膜—镜背漆；四层结构为：玻璃—Ag—Cu—镜背漆。高级镜子在镜背漆之上加一防水层，能增强对潮湿环境的抵抗能力，提高耐久性。制造镜面玻璃的方法有手工涂饰和机械化涂饰两种。一般说来，机械化硝酸银镀膜镜与手工镀银镜相比，具有镜面尺寸大、成像清晰逼真、抗盐雾、抗湿热性能好、使用寿命长等特点。

镜面玻璃多用在有影像要求的部位，如卫生间、穿衣镜、梳妆台等。镜面玻璃也是装饰中常用的饰面材料，在厅堂的墙面、柱面、吊顶等部位，利用镜子的影像功能，在室内空间产生“动感”，不仅扩大了空间，同时也使周围的景物映到镜子上，起到景物互相借用、丰富空间的艺术效果。

3. 安全玻璃

1) 钢化玻璃

钢化玻璃又称为强化玻璃，是经强化处理，具有良好的机械性能和耐热、安全性能的玻璃制品的统称。钢化玻璃强化的目的是通过淬火(物理方法)或类似于淬火(化学方法)的方法，使得冷却硬化速度较快的玻璃外表面处于受压状态，而玻璃内部则处于受拉状态，这相当于给玻璃施加了一定的预加应力，因而这种玻璃在性能上有一定的改进。按照强化方式不同，钢化玻璃可分为两种：化学钢化玻璃和物理钢化玻璃。钢化玻璃的性能特点如下。

(1) 机械强度高。钢化玻璃抗折强度可达 125MPa 以上，比同厚度的普通玻璃要高 4～5 倍，抗冲击的能力也很高。

(2) 弹性好。钢化玻璃的弹性要比同厚度的普通玻璃大得多，试验测定，一块 1 200mm×350mm×6mm 的钢化玻璃，受力后可发生达 100mm 的弯曲挠度，并且在外力撤销后仍能恢复原来的形状，而普通玻璃挠度在达到几毫米时就发生破坏。

(3) 热稳定性能好。当玻璃受到急冷急热变化时，玻璃表面可能会产生一定的拉应力，但由于钢化玻璃预加了一层压应力层，因而可以抵消掉一部分的拉应力作用，这样可使玻璃不发生炸裂，从而提高了玻璃的急冷急热性能。钢化玻璃耐热冲击，最大安全工作温度为288℃，能承受204℃温度变化。

(4) 安全性好。钢化玻璃在发生破坏时，它的碎片一般没有尖锐的棱角(化学钢化玻璃除外)，不易伤人，所以钢化玻璃的安全性较好。

钢化玻璃主要用作建筑物的门窗、隔墙、幕墙和采光屋面以及电话亭、车、船、设备等门窗、观察孔等。钢化玻璃可做成无框玻璃门。钢化玻璃用作幕墙时可大大提高抗风压能力，防止热炸裂，并可增大单块玻璃的面积，减少支承结构。使用时需注意的是钢化玻璃不能切割、磨削，边角也不能碰击挤压，需按照现成的尺寸规格选用或提出具体设计图纸进行加工订制。

2) 夹丝玻璃

夹丝玻璃也称防碎玻璃或钢丝玻璃。它是由用连续压延法制造而得的。当玻璃经过压延机的两辊中间时，从玻璃上面或下面连续送入经过预处理的金属丝或金属网，使其随着玻璃从辊中经过，从而嵌入玻璃中。

夹丝玻璃防火性能好。当遭受火灾，夹丝玻璃产生开裂，但由于金属网的作用，玻璃仍能保持固定，起到隔绝火势的作用，夹丝玻璃因此又称为防火玻璃。由于钢丝网的骨架作用，不仅提高了夹丝玻璃的强度，而且遭受冲击力或受火灾作用产生开裂或破坏后玻璃并不散开，碎片也不易飞溅，安全性好。夹丝玻璃作为防火材料，通常用于防火门窗；作为非防火材料，可用于易受到冲击的地方或者玻璃飞溅可能导致危险的地方，如震动较大的厂房、天棚、高层建筑、公共建筑的天窗、仓库门窗、地下采光窗等。夹丝玻璃可以切割，但当切断玻璃时，需要对裸露在外的金属丝进行防锈处理，以防止生锈造成的体积膨胀引起玻璃的锈裂。

3) 夹层玻璃

两片或多片平板玻璃之间嵌夹一层或多层透明塑料膜片，经加热、加压黏合成平面的或弯曲面的复合玻璃制品，称为夹层玻璃。生产夹层玻璃的平板玻璃可以是普通平板玻璃、浮法玻璃、磨光玻璃、彩色玻璃或反射玻璃，但品质要求较高。中间的塑料夹层柔软而强韧，具有防水和抗日光老化作用。

夹层玻璃为一种复合材料，它的抗弯强度和冲击韧性通常要比普通平板玻璃高好几倍；当它受到冲击作用而开裂时，由于中间埋料层的黏结作用，仅产生辐射状裂纹，碎片不会飞溅四溢。嵌有三层塑料片的四层夹层玻璃，具有防弹作用。此外，夹层玻璃还有透明性好、耐光、耐热、耐湿、耐寒、隔声和保温，长期使用不易变色、老化等特点。

夹层玻璃一般用于有特殊安全要求的建筑物门窗、隔墙，工业厂房的天窗，安全性要求比较高的窗户，商品陈列橱窗，大厦地下室，屋顶及天窗等有飞散物落下的场所。夹层玻璃不能切割，需要选用定型产品或按照尺寸订制。

4. 节能型装饰玻璃

1) 吸热玻璃

吸热玻璃是指能吸收大量红外线辐射能量而又保持良好透光率的平板玻璃。吸热玻璃

对太阳的辐射热有较强的吸收能力，当太阳光照射在吸热玻璃上时，相当一部分的太阳辐射能被吸热玻璃吸收，被吸收的热量可向室内、室外散发。吸热玻璃的这一特点，使得它可明显降低夏季室内的温度，避免了由于使用普通玻璃而带来的暖房效应(由于太阳能过多进入室内而引起的室温上升的现象)。

吸热玻璃也能吸收太阳的可见光，能使刺目的阳光变得柔和，起到良好的防眩作用。特别是在炎热的夏天，能有效地改善室内照明，使人感到舒适凉爽。吸热玻璃具有一定的透明度，能清晰地观察室外景物。此外，吸热玻璃的色泽不易发生变化。

吸热玻璃在建筑工程中应用广泛，凡既需采光又需隔热之处均可采用。尤其是用于炎热地区需设置空调、避免眩光的建筑物门窗或外墙体以及火车、汽车、轮船挡风玻璃等，起隔热、空调、防眩作用。采用各种不同颜色的吸热玻璃，不但能合理利用太阳光，调节室内与车船内的温度，节约能源费用，而且能创造舒适优美的环境。

吸热玻璃还可以按不同用途进行加工，制成磨光、钢化、夹层、镜面及中空玻璃。在外部围护结构中用它配置彩色玻璃窗，在室内装饰中用它镶嵌玻璃隔断、装饰家具、增加美感。

2) 热反射玻璃

热反射玻璃又称镀膜玻璃。它是用一定的工艺在玻璃表面涂以金属氧化物薄膜或非金属氧化物薄膜，形成热反射膜，从而使玻璃具有遮阳、隔热、防眩、装饰等效果。热反射玻璃的生产方法有热分解法、喷涂法、浸涂法、真空离子镀膜法等。常见的颜色有金色、茶色、灰色、紫色、褐色、青铜色和浅蓝等。

热反射玻璃对太阳辐射有较高的反射能力。普通平板玻璃的辐射热反射率为 7%～8%，热反射玻璃则达 30%左右。热反射玻璃在日晒时，室内温度仍可保持稳定，光线柔和，改变建筑物内的色调，避免眩光，改善室内环境。

热反射玻璃具有良好的隔热性能。镀金属膜的热反射玻璃具有单向透像的特性。镀膜热反射玻璃的表面金属层极薄，使它的迎光面具有镜子的特性，而在背面则又如窗玻璃那样透明。即在白天能在室内看见室外景物，而在室外却看不到室内的景象，对建筑物内部起到遮蔽及帷幕的作用，而在晚上的情形则相反，室内的人看不到外面，而室外却可清楚地看到室内。这对商店等的装饰很有意义。用热反射玻璃作幕墙和门窗，可使整个建筑变成一座闪闪发光的玻璃宫殿。由于热反射玻璃具有这两种功能，所以它为建筑设计的创新和立面的处理、构图提供了良好的条件。

热反射玻璃主要用于避免由于太阳辐射而增热及设置空调的建筑物。适用于建筑物的门窗、汽车和轮船的玻璃窗，常用作玻璃幕墙及各种艺术装饰。热反射玻璃还常用作生产中空玻璃或夹层玻璃的原片，以改善这些玻璃的绝热性能。

3) 中空玻璃

中空玻璃是两片或多片平板玻璃用边框隔开，四周边用胶接、焊接或熔接的方法密封，中间充入干燥空气或其他气体的玻璃制品。

中空玻璃具有独特的隔热性能和特点。一般来说，普通的 12mm 双层中空玻璃的导热系数为 3.59W/(m·K)，可节约能源 20%～40%，噪声可以从 80dB 降到 30dB。

中空玻璃窗除保温隔热、减少噪声外，还可以避免冬季窗户结露。通常情况下，中空玻璃接触到室内高湿度空气的时候，玻璃表面温度较高，而外层玻璃虽然温度低，但接触

到的空气的温度也低，所以不会结露，并能保持一定的室内湿度。中空玻璃内部空气的干燥度是中空玻璃最重要的质量指标。

中空玻璃主要用于需要采暖、空调、防止噪声或结露以及需要无直射阳光的建筑物上，广泛用于住宅、饭店、宾馆、办公楼、学校、医院、商店等需要室内空调的场合。

中空玻璃一般不能切割，可按设计要求的尺寸向厂家订制或者按照厂家的产品规格进行选择。

特别提示

引例(2)分析：高档高层建筑一般设空调。广东气温较高，尤其是夏天炎热，热反射玻璃主要靠反射太阳能达到隔热目的。而吸热玻璃对太阳能的吸收系数大于反射系数，气温较高的地区使用热反射玻璃更有利于减轻冷负荷和节能。

8.5.6 建筑装饰涂料

建筑装饰涂料是指涂敷于建筑构件的表面，并能与建筑构件表面材料很好地黏结，形成完整装饰和保护膜的材料。建筑装饰涂料不仅具有色彩鲜艳、造型丰富，质感与装饰效果好等特点，而且还具有施工方便、易于维修、造价较低、自身质量小、施工效率高，可在各种复杂的墙面上施工等优点。

1. 建筑装饰涂料的组成

建筑装饰涂料是由多种物质经混合、溶解、分散而组成的。按照各种组成材料在涂料生产、施工和使用中所起作用的不同，其基本组分可分为：主要成膜物质、次要成膜物质和辅助成膜物质 3 部分。

2. 涂料的分类

按用途分类，可分为外墙涂料、内墙涂料、顶棚涂料、地面涂料和屋面涂料等。

按成膜物质分类，可分为有机涂料、无机涂料、有机无机复合涂料等。

按分散介质分类，可分为溶剂型涂料、水乳型涂料和水溶型涂料等。

按涂层质感分类，可分为薄质涂料、厚质涂料、复层建筑涂料等。

3. 常见建筑装饰涂料

1) 有机建筑涂料

(1) 溶剂型建筑涂料。

溶剂型建筑涂料是以高分子合成树脂或油脂为主要成膜物质，以有机溶剂为稀释剂，再加入适量的颜料、填料及助剂，经研磨而成的涂料。

溶剂型建筑涂料的涂膜细腻、光洁、坚韧，有较好的硬度、光泽以及耐水性、耐候性、耐酸碱性能及气密性较好。它的缺点为：易燃，溶剂挥发时对人体有害，施工时要求基层干燥，涂膜透气性差，价格较乳胶漆贵。

溶剂型建筑涂料的常见品种有：氯化橡胶外墙涂料、丙烯酸酯外墙涂料、聚氨酯系外墙涂料、丙烯酸酯有机硅外墙涂料、过氯乙烯地面涂料、聚氨酯-丙烯酸酯地面涂料、磁漆、聚酯漆等。

(2) 水溶型建筑涂料。

水溶型建筑涂料是以水溶性合成树脂为主要成膜物质，以水为稀释剂，再加入适量颜料、填料及助剂，经研磨而成的涂料。

水溶型建筑涂料是用水作为稀释剂，具有无毒，环保且成本较低的优点。它的缺点是涂膜耐水性差，耐候性不强，耐洗刷性差，故这种涂料一般只能作为内墙涂料。

水溶型建筑涂料的常见品种有：聚乙烯醇水玻璃内墙涂料(俗称 106 涂料)、聚乙烯缩甲醛(俗称 803 涂料)、改性聚乙烯醇系内墙涂料等。

(3) 乳液型建筑涂料。

乳液型建筑涂料又称乳胶漆。它是由合成树脂借助乳化剂的作用，以 0.1～0.5 μm 的极细微粒分散于水中构成的乳液，并以乳液作为主要成膜物质，再加入适量颜料、填料等助剂，经研磨而成的涂料。

乳液型建筑涂料以水作为稀释剂，价格便宜，无毒、不燃，对人体无害，形成的涂膜具有一定透气性，涂布时不需要基层很干燥，涂膜固化后的耐水性和耐擦洗的性能较好。乳液型建筑涂料可作为室内外墙建筑涂料。

乳液型建筑涂料的常见品种有：聚酯酸乙烯乳胶漆、丙烯酸酯乳胶漆、乙-丙乳胶漆、苯-丙乳胶漆等内墙涂料以及乙丙乳液外墙涂料、苯丙乳液外墙涂料、丙烯酸酯乳液涂料、氯-醋-丙涂料、水乳型环氧树脂外墙涂料等。

特别提示

乳液型建筑涂料通常必须在 10℃以上才能保证涂膜质量，否则会导致涂料出现裂纹，所以冬季一般不能使用。

2) 无机建筑涂料

无机建筑涂料是以碱金属硅酸盐或硅溶胶为主要成膜物质，加入相应的固化剂或有机合成树脂、着色颜料、填料及助剂等配制而成的涂料。无机建筑涂料按主要成膜物质的不同，分为 A 和 B 两类。A 类以碱金属硅酸盐及其混合物为主要成膜物质，其代表产品为 JH80-1 型无机建筑涂料；B 类以硅溶胶为主要成膜物质，其代表产品为 JH80-2 型无机建筑涂料。JH80-1 型无机建筑涂料是以硅酸钾为主要成膜物质，必须掺入固化剂的双组分涂料，形成的涂膜坚硬、有较好的耐水性。JH80-2 型无机建筑涂料是以二氧化硅(又称硅溶胶)为主要成膜物质，不需固化剂的涂料，涂膜耐酸、耐碱、耐冻融、耐污染性好，但柔韧性差、光泽较差。

无机建筑涂料的耐水性、耐碱性和抗老化性等比有机涂料好，其黏结力强，对基层处理要求不严，而且成膜温度低，最低成膜温度是 5℃，在 0℃以下仍可固化，储存稳定性好，资源丰富、生产工艺简单、施工方便。

无机建筑涂料适用于混凝土墙面、水泥砂浆抹灰墙体、水泥石棉板、砖墙和石膏板等基层。

3) 复合建筑涂料

无机-有机复合涂料是一种新型涂料。它既含有有机高分子成膜物质，又含有无机成膜物质，兼有有机和无机涂料的优点，又弥补了两者的不足，起到了互相改性的作用，是一种很有发展前途的优良建筑装饰涂料。无机-有机复合涂料分为品种复合和涂层复合两类。

品种复合是由水性合成树脂和水溶性硅酸盐、重磷酸盐等配制成混合液或分散液，或在无机物表面上使用有机聚合物接枝制成悬浮液。涂层复合是在基层上先涂一层有机涂料，再在基层上涂覆一层无机涂料的一种装饰做法。

本任务小结

本任务对防水材料、绝热材料、吸声与隔声材料、建筑塑料、装饰材料作了较详细的阐述，包括石油沥青的性质、防水卷材防水涂料的种类及选用和验收、绝热材料的作用和基本要求及材料的种类、吸声与隔声材料的种类性质、常见建筑塑料的性能特点和应用、常见装饰材料的种类性质与应用等。

具体内容包括：石油沥青的性质主要有黏度、延度、温度稳定性和大气稳定性等。防水卷材主要有改性沥青防水卷材和合成高分子防水卷材。防水涂料主要有高聚物改性沥青类防水涂料。防水材料要根据不同环境情况进行选用，严格验收程序。绝热材料对建筑节能有重要作用，选用绝热材料时要综合考虑。吸声与隔声材料具有各自的特点，根据具体情况选用。建筑塑料及制品的性能特点和应用。常见装饰材料(包括建筑陶瓷、天然与人造石材、金属材料、建筑玻璃及建筑装饰涂料)的种类、性质与应用。

本任务的教学目标是使学生掌握各种典型功能材料的种类、性质特点，会根据不同的需要选择不同的材料，会合理选择防水材料，会根据工程特点和环境要求选择装饰材料。

习题

一、填空题

1．石油沥青的主要组分有__________、__________、__________。

2．同一品种石油沥青的牌号越高，则针入度越__________，黏性越__________；延伸度越__________，塑性越__________；软化点越__________，温度敏感性越__________。

3．SBS改性沥青防水卷材的，是以__________或__________为胎基，__________为改性剂，两面覆以__________材料所制成的建筑防水卷材，属于__________体改性沥青防水卷材。

4．APP改性沥青防水卷材的，是以__________或__________为胎基，__________为改性剂，两面覆以__________材料所制成的建筑防水卷材，属于__________体改性沥青防水卷材。

5．保温隔热材料应选择导热系数__________，比热容和热容__________的材料。

6．大理石不宜用于室外，是因为抗__________性能较差，而花岗岩__________性能较差。

7．隔声主要是指隔绝__________声和隔绝__________声。

二、选择题

1．石油沥青的黏性是以(　　)表示的。

A．针入度　　B．延度　　C．软化点　　D．溶解度

2．以下涂料品种中，对环保不利的是(　　)。

A．溶剂型涂料　B．水溶性涂料　C．乳胶涂料　D．无机涂料

3．建筑塑料中最基本的组成是(　　)。

A．增塑剂　B．稳定剂　C．填充剂　D．合成树脂

4．建筑工程中常用的PVC塑料是指(　　)。

A．聚乙烯塑料　B．聚氯乙烯塑料

C．酚醛塑料　D．聚苯乙烯塑料

5．建筑结构中，主要起吸声作用且吸声系数不小于(　　)的材料称为吸声材料。

A．0.1　B．0.2　C．0.3　D．0.4

三、简答题

1．建筑石油沥青、道路石油沥青和普通石油沥青的应用各如何？

2．SBS改性沥青防水卷材和APP改性沥青卷材性能有何异同？

3．沥青为何会老化？如何延缓沥青老化？

4．防水卷材可分为几大类？请分别举出每一类中几个代表品种。

5．防水材料选用要注意哪些主要问题？

6．玻璃的性质有哪些？钢化玻璃的特点和用途是什么？

7．花岗石和大理石外观、性能及应用范围上有何区别？

8．建筑工程对保温、绝热材料的基本要求是什么？

9．常见吸声材料的结构形式有哪些？

10．绝热材料导热系数的影响因素主要有哪些？

11．建筑陶瓷主要有哪些品种？试举例说明。

12．金属类装饰材料有什么样的特点？

四、计算题

现有软化点分别为95℃和25℃的两种石油沥青，某工程的屋面防水要求使用软化点为75℃的石油沥青，问应如何配制？

北京大学出版社高职高专土建系列规划教材

序号	书名	书号	编著者	定价	出版时间	印次	配套情况
			基础课程				
1	工程建设法律与制度	978-7-301-14158-8	唐茂华	26.00	2012.7	6	ppt/pdf
2	建设法规及相关知识	978-7-301-22748-0	唐茂华等	34.00	2014.9	2	ppt/pdf
3	建设工程法规(第 2 版)	978-7-301-24493-7	皇甫婧琪	40.00	2014.12	2	ppt/pdf/答案/素材
4	建筑工程法规实务	978-7-301-19321-1	杨陈慧等	43.00	2012.1	4	ppt/pdf
5	建筑法规	978-7-301-19371-6	董伟等	39.00	2013.1	4	ppt/pdf
6	建设工程法规	978-7-301-20912-7	王先恕	32.00	2012.7	3	ppt/ pdf
7	AutoCAD 建筑制图教程(第 2 版)	978-7-301-21095-6	郭　慧	38.00	2014.12	6	ppt/pdf/素材
8	AutoCAD 建筑绘图教程(第 2 版)	978-7-301-24540-8	唐英敏等	44.00	2014.7	1	ppt/pdf
9	建筑 CAD 项目教程(2010 版)	978-7-301-20979-0	郭　慧	38.00	2012.9	2	pdf/素材
10	建筑工程专业英语	978-7-301-15376-5	吴承霞	20.00	2013.8	8	ppt/pdf
11	建筑工程专业英语	978-7-301-20003-2	韩薇等	24.00	2014.7	2	ppt/ pdf
12	★建筑工程应用文写作(第 2 版)	978-7-301-24480-7	赵立等	50.00	2014.7	1	ppt/pdf
13	建筑识图与构造(第 2 版)	978-7-301-23774-8	郑贵超	40.00	2014.12	2	ppt/pdf/答案
14	建筑构造	978-7-301-21267-7	肖　芳	34.00	2014.12	4	ppt/ pdf
15	房屋建筑构造	978-7-301-19883-4	李少红	26.00	2012.1	4	ppt/pdf
16	建筑识图	978-7-301-21893-8	邓志勇等	35.00	2013.1	2	ppt/ pdf
17	建筑识图与房屋构造	978-7-301-22860-9	贠禄等	54.00	2015.1	2	ppt/pdf /答案
18	建筑构造与设计	978-7-301-23506-5	陈玉萍	38.00	2014.1	1	ppt/pdf /答案
19	房屋建筑构造	978-7-301-23588-1	李元玲等	45.00	2014.1	1	ppt/pdf
20	建筑构造与施工图识读	978-7-301-24470-8	南学平	52.00	2014.8	1	ppt/pdf
21	建筑工程制图与识图(第 2 版)	978-7-301-24408-1	白丽红	29.00	2014.7	1	ppt/pdf
22	建筑制图习题集(第 2 版)	978-7-301-24571-2	白丽红	25.00	2014.8	1	pdf
23	建筑制图(第 2 版)	978-7-301-21146-5	高丽荣	32.00	2013.2	4	ppt/pdf
24	建筑制图习题集(第 2 版)	978-7-301-21288-2	高丽荣	28.00	2014.12	5	pdf
25	建筑工程制图(第 2 版)(附习题册)	978-7-301-21120-5	肖明和	48.00	2012.8	3	ppt/pdf
26	建筑制图与识图	978-7-301-18806-2	曹雪梅	36.00	2014.9	1	ppt/pdf
27	建筑制图与识图习题册	978-7-301-18652-7	曹雪梅等	30.00	2012.4	4	pdf
28	建筑制图与识图	978-7-301-20070-4	李元玲	28.00	2012.8	5	ppt/pdf
29	建筑制图与识图习题集	978-7-301-20425-2	李元玲	24.00	2012.3	4	ppt/pdf
30	新编建筑工程制图	978-7-301-21140-3	方筱松	30.00	2014.8	2	ppt/ pdf
31	新编建筑工程制图习题集	978-7-301-16834-9	方筱松	22.00	2014.1	2	pdf
			建筑施工类				
1	建筑工程测量	978-7-301-16727-4	赵景利	30.00	2013.8	11	ppt/pdf /答案
2	建筑工程测量(第 2 版)	978-7-301-22002-3	张敬伟	37.00	2013.5	5	ppt/pdf /答案
3	建筑工程测量实验与实训指导(第 2 版)	978-7-301-23166-1	张敬伟	27.00	2013.9	2	pdf/答案
4	建筑工程测量	978-7-301-19992-3	潘益民	38.00	2012.2	2	ppt/ pdf
5	建筑工程测量	978-7-301-13578-5	王金玲等	26.00	2011.8	3	pdf
6	建筑工程测量实训（第 2 版）	978-7-301-24833-1	杨凤华	34.00	2015.1	1	pdf/答案
7	建筑工程测量(含实验指导手册)	978-7-301-19364-8	石　东等	43.00	2012.6	3	ppt/pdf/答案
8	建筑工程测量	978-7-301-22485-4	景　铎等	34.00	2013.6	1	ppt/pdf
9	建筑施工技术	978-7-301-21209-7	陈雄辉	39.00	2013.2	4	ppt/pdf
10	建筑施工技术	978-7-301-12336-2	朱永祥等	38.00	2012.4	7	ppt/pdf
11	建筑施工技术	978-7-301-16726-7	叶　雯等	44.00	2013.5	6	ppt/pdf /素材
12	建筑施工技术	978-7-301-19499-7	董伟等	42.00	2011.9	2	ppt/pdf
13	建筑施工技术	978-7-301-19997-8	苏小梅	38.00	2013.5	3	ppt/pdf
14	建筑工程施工技术(第 2 版)	978-7-301-21093-2	钟汉华等	48.00	2013.8	5	ppt/pdf
15	数字测图技术	978-7-301-22656-8	赵　红	36.00	2013.6	1	ppt/pdf
16	数字测图技术实训指导	978-7-301-22679-7	赵　红	27.00	2013.6	1	ppt/pdf
17	基础工程施工	978-7-301-20917-2	董伟等	35.00	2012.7	2	ppt/pdf
18	建筑施工技术实训(第 2 版)	978-7-301-24368-8	周晓龙	30.00	2014.12	2	pdf
19	建筑力学(第 2 版)	978-7-301-21695-8	石立安	46.00	2014.12	5	ppt/pdf

序号	书名	书号	编著者	定价	出版时间	印次	配套情况
20	★土木工程实用力学	978-7-301-15598-1	马景善	30.00	2013.1	4	pdf/ppt
21	土木工程力学	978-7-301-16864-6	吴明军	38.00	2011.11	2	ppt/pdf
22	PKPM 软件的应用(第 2 版)	978-7-301-22625-4	王　娜等	34.00	2013.6	2	pdf
23	建筑结构(第 2 版)(上册)	978-7-301-21106-9	徐锡权	41.00	2013.4	2	ppt/pdf/答案
24	建筑结构(第 2 版)(下册)	978-7-301-22584-4	徐锡权	42.00	2013.6	2	ppt/pdf/答案
25	建筑结构	978-7-301-19171-2	唐春平等	41.00	2012.6	4	ppt/pdf
26	建筑结构基础	978-7-301-21125-0	王中发	36.00	2012.8	2	ppt/pdf
27	建筑结构原理及应用	978-7-301-18732-6	史美东	45.00	2012.8	1	ppt/pdf
28	建筑力学与结构(第 2 版)	978-7-301-22148-8	吴承霞等	49.00	2014.12	5	ppt/pdf/答案
29	建筑力学与结构(少学时版)	978-7-301-21730-6	吴承霞	34.00	2014.8	3	ppt/pdf/答案
30	建筑力学与结构	978-7-301-20988-2	陈水广	32.00	2012.8	1	pdf/ppt
31	建筑力学与结构	978-7-301-23348-1	杨丽君等	44.00	2014.1	1	ppt/pdf
32	建筑结构与施工图	978-7-301-22188-4	朱希文等	35.00	2013.3	2	ppt/pdf
33	生态建筑材料	978-7-301-19588-2	陈剑峰等	38.00	2013.7	2	ppt/pdf
34	建筑材料(第 2 版)	978-7-301-24633-7	林祖宏	35.00	2014.8	1	ppt/pdf
35	建筑材料与检测	978-7-301-16728-1	梅　杨等	26.00	2012.11	9	ppt/pdf/答案
36	建筑材料检测试验指导	978-7-301-16729-8	王美芬等	18.00	2014.12	7	pdf
37	建筑材料与检测	978-7-301-19261-0	王　辉	35.00	2012.6	5	ppt/pdf
38	建筑材料与检测试验指导	978-7-301-20045-2	王　辉	20.00	2013.1	3	ppt/pdf
39	建筑材料选择与应用	978-7-301-21948-5	申淑荣等	39.00	2013.3	2	ppt/pdf
40	建筑材料检测实训	978-7-301-22317-8	申淑荣等	24.00	2013.4	1	pdf
41	建筑材料	978-7-301-24208-7	任晓菲	40.00	2014.7	1	ppt/pdf /答案
42	建设工程监理概论(第 2 版)	978-7-301-20854-0	徐锡权等	43.00	2014.12	5	ppt/pdf /答案
43	★建设工程监理(第 2 版)	978-7-301-24490-6	斯　庆	35.00	2014.9	1	ppt/pdf /答案
44	建设工程监理概论	978-7-301-15518-9	曾庆军等	24.00	2012.12	5	ppt/pdf
45	工程建设监理案例分析教程	978-7-301-18984-9	刘志麟等	38.00	2013.2	2	ppt/pdf
46	地基与基础(第 2 版)	978-7-301-23304-7	肖明和等	42.00	2014.12	2	ppt/pdf/答案
47	地基与基础	978-7-301-16130-2	孙平平等	26.00	2013.2	3	ppt/pdf
48	地基与基础实训	978-7-301-23174-6	肖明和等	25.00	2013.10	1	ppt/pdf
49	土力学与地基基础	978-7-301-23675-8	叶火炎等	35.00	2014.1	1	ppt/pdf
50	土力学与基础工程	978-7-301-23590-4	宁培淋等	32.00	2014.1	1	ppt/pdf
51	建筑工程质量事故分析(第 2 版)	978-7-301-22467-0	郑文新	32.00	2014.12	3	ppt/pdf
52	建筑工程施工组织设计	978-7-301-18512-4	李源清	26.00	2014.12	7	ppt/pdf
53	建筑工程施工组织实训	978-7-301-18961-0	李源清	40.00	2014.12	4	ppt/pdf
54	建筑施工组织与进度控制	978-7-301-21223-3	张廷瑞	36.00	2012.9	3	ppt/pdf
55	建筑施工组织项目式教程	978-7-301-19901-5	杨红玉	44.00	2012.1	2	ppt/pdf/答案
56	钢筋混凝土工程施工与组织	978-7-301-19587-1	高　雁	32.00	2012.5	2	ppt/pdf
57	钢筋混凝土工程施工与组织实训指导(学生工作页)	978-7-301-21208-0	高　雁	20.00	2012.9	1	ppt
58	建筑材料检测试验指导	978-7-301-24782-2	陈东佐等	20.00	2014.9	1	ppt
59	★建筑节能工程与施工	978-7-301-24274-2	吴明军等	35.00	2014.11	1	ppt/pdf
60	建筑施工工艺	978-7-301-24687-0	李源清等	49.50	2015.1	1	pdf/ppt/答案
61	建筑材料与检测(第 2 版)	978-7-301-25347-2	梅　杨等	33.00	2015.2	1	pdf/ppt/答案
	工 程 管 理 类						
1	建筑工程经济(第 2 版)	978-7-301-22736-7	张宁宁等	30.00	2014.12	6	ppt/pdf/答案
2	★建筑工程经济(第 2 版)	978-7-301-24492-0	胡六星等	41.00	2014.9	1	ppt/pdf/答案
3	建筑工程经济	978-7-301-24346-6	刘晓丽等	38.00	2014.7	1	ppt/pdf/答案
4	施工企业会计(第 2 版)	978-7-301-24434-0	辛艳红等	36.00	2014.7	1	ppt/pdf/答案
5	建筑工程项目管理	978-7-301-12335-5	范红岩等	30.00	2012. 4	9	ppt/pdf
6	建设工程项目管理(第 2 版)	978-7-301-24683-2	王　辉	36.00	2014.9	1	ppt/pdf/答案
7	建设工程项目管理	978-7-301-19335-8	冯松山等	38.00	2013.11	3	pdf/ppt
8	★建设工程招投标与合同管理(第 3 版)	978-7-301-24483-8	宋春岩	40.00	2014.12	2	ppt/pdf/ 答 案 / 试题/教案
9	建筑工程招投标与合同管理	978-7-301-16802-8	程超胜	30.00	2012.9	2	pdf/ppt

序号	书名	书号	编著者	定价	出版时间	印次	配套情况
10	工程招投标与合同管理实务	978-7-301-19035-7	杨甲奇等	48.00	2011.8	3	pdf
11	工程招投标与合同管理实务	978-7-301-19290-0	郑文新等	43.00	2012.4	2	ppt/pdf
12	建设工程招投标与合同管理实务	978-7-301-20404-7	杨云会等	42.00	2012.4	2	ppt/pdf/答案/习题库
13	工程招投标与合同管理	978-7-301-17455-5	文新平	37.00	2012.9	1	ppt/pdf
14	工程项目招投标与合同管理(第 2 版)	978-7-301-24554-5	李洪军等	42.00	2014.12	2	ppt/pdf/答案
15	工程项目招投标与合同管理(第 2 版)	978-7-301-22462-5	周艳冬	35.00	2014.12	3	ppt/pdf
16	建筑工程商务标编制实训	978-7-301-20804-5	钟振宇	35.00	2012.7	1	ppt
17	建筑工程安全管理	978-7-301-19455-3	宋　健等	36.00	2013.5	4	ppt/pdf
18	建筑工程质量与安全管理	978-7-301-16070-1	周连起	35.00	2014.12	8	ppt/pdf/答案
19	施工项目质量与安全管理	978-7-301-21275-2	钟汉华	45.00	2012.10	1	ppt/pdf/答案
20	工程造价控制(第 2 版)	978-7-301-24594-1	斯　庆	32.00	2014.8	1	ppt/pdf/答案
21	工程造价管理	978-7-301-20655-3	徐锡权等	33.00	2013.8	3	ppt/pdf
22	工程造价控制与管理	978-7-301-19366-2	胡新萍等	30.00	2014.12	4	ppt/pdf
23	建筑工程造价管理	978-7-301-20360-6	柴　琦等	27.00	2014.12	4	ppt/pdf
24	建筑工程造价管理	978-7-301-15517-2	李茂英等	24.00	2012.1	4	pdf
25	工程造价案例分析	978-7-301-22985-9	甄　凤	30.00	2013.8	1	pdf/ppt
26	建设工程造价控制与管理	978-7-301-24273-5	胡芳珍等	38.00	2014.6	1	ppt/pdf/答案
27	建筑工程造价	978-7-301-21892-1	孙咏梅	40.00	2013.2	1	ppt/pdf
28	★建筑工程计量与计价(第 2 版)	978-7-301-22078-8	肖明和等	58.00	2014.12	5	pdf/ppt
29	★建筑工程计量与计价实训(第 2 版)	978-7-301-22606-3	肖明和等	29.00	2014.12	4	pdf
30	建筑工程计量与计价综合实训	978-7-301-23568-3	龚小兰	28.00	2014.1	1	pdf
31	建筑工程估价	978-7-301-22802-9	张　英	43.00	2013.8	1	ppt/pdf
32	建筑工程计量与计价——透过案例学造价(第 2 版)	978-7-301-23852-3	张　强	59.00	2014.12	3	ppt/pdf
33	安装工程计量与计价(第 3 版)	978-7-301-24539-2	冯　钢等	54.00	2014.8	2	pdf/ppt
34	安装工程计量与计价综合实训	978-7-301-23294-1	成春燕	49.00	2014.12	3	pdf/素材
35	安装工程计量与计价实训	978-7-301-19336-5	景巧玲等	36.00	2013.5	4	pdf/素材
36	建筑水电安装工程计量与计价	978-7-301-21198-4	陈连姝	36.00	2013.8	3	ppt/pdf
37	建筑与装饰装修工程工程量清单	978-7-301-17331-2	翟丽旻等	25.00	2012.8	4	pdf/ppt/答案
38	建筑工程清单编制	978-7-301-19387-7	叶晓容	24.00	2011.8	2	ppt/pdf
39	建设项目评估	978-7-301-20068-1	高志云等	32.00	2013.6	2	ppt/pdf
40	钢筋工程清单编制	978-7-301-20114-5	贾莲英	36.00	2012.2	2	ppt / pdf
41	混凝土工程清单编制	978-7-301-20384-2	顾　娟	28.00	2012.5	1	ppt / pdf
42	建筑装饰工程预算	978-7-301-20567-9	范菊雨	38.00	2013.6	2	pdf/ppt
43	建设工程安全监理	978-7-301-20802-1	沈万岳	28.00	2012.7	1	pdf/ppt
44	建筑工程安全技术与管理实务	978-7-301-21187-8	沈万岳	48.00	2012.9	2	pdf/ppt
45	建筑工程资料管理	978-7-301-17456-2	孙　刚等	36.00	2014.12	5	pdf/ppt
46	建筑施工组织与管理(第 2 版)	978-7-301-22149-5	翟丽旻等	43.00	2014.12	3	ppt/pdf/答案
47	建设工程合同管理	978-7-301-22612-4	刘庭江	46.00	2013.6	1	ppt/pdf/答案
48	★工程造价概论	978-7-301-24696-2	周艳冬	31.00	2015.1	1	ppt/pdf/答案
	建 筑 设 计 类						
1	中外建筑史(第 2 版)	978-7-301-23779-3	袁新华等	38.00	2014.2	2	ppt/pdf
2	建筑室内空间历程	978-7-301-19338-9	张伟孝	53.00	2011.8	1	pdf
3	建筑装饰 CAD 项目教程	978-7-301-20950-9	郭　慧	35.00	2013.1	2	ppt/素材
4	室内设计基础	978-7-301-15613-1	李书青	32.00	2013.5	3	ppt/pdf
5	建筑装饰构造	978-7-301-15687-2	赵志文等	27.00	2012.11	6	ppt/pdf/答案
6	建筑装饰材料(第 2 版)	978-7-301-22356-7	焦　涛等	34.00	2013.5	1	ppt/pdf
7	★建筑装饰施工技术(第 2 版)	978-7-301-24482-1	王　军	37.00	2014.7	2	ppt/pdf
8	设计构成	978-7-301-15504-2	戴碧锋	30.00	2012.10	2	ppt/pdf
9	基础色彩	978-7-301-16072-5	张　军	42.00	2011.9	2	pdf
10	设计色彩	978-7-301-21211-0	龙黎黎	46.00	2012.9	1	ppt
11	设计素描	978-7-301-22391-8	司马金桃	29.00	2013.4	2	ppt
12	建筑素描表现与创意	978-7-301-15541-7	于修国	25.00	2012.11	3	Pdf
13	3ds Max 效果图制作	978-7-301-22870-8	刘　晗等	45.00	2013.7	1	ppt
14	3ds max 室内设计表现方法	978-7-301-17762-4	徐海军	32.00	2010.9	1	pdf

序号	书名	书号	编著者	定价	出版时间	印次	配套情况
15	Photoshop 效果图后期制作	978-7-301-16073-2	脱忠伟等	52.00	2011.1	2	素材/pdf
16	建筑表现技法	978-7-301-19216-0	张　峰	32.00	2013.1	2	ppt/pdf
17	建筑速写	978-7-301-20441-2	张　峰	30.00	2012.4	1	pdf
18	建筑装饰设计	978-7-301-20022-3	杨丽君	36.00	2012.2	1	ppt/素材
19	装饰施工读图与识图	978-7-301-19991-6	杨丽君	33.00	2012.5	1	ppt
20	建筑装饰工程计量与计价	978-7-301-20055-1	李茂英	42.00	2013.7	3	ppt/pdf
21	3ds Max & V-Ray 建筑设计表现案例教程	978-7-301-25093-8	郑恩峰	40.00	2014.12	1	ppt/pdf
	规划园林类						
1	城市规划原理与设计	978-7-301-21505-0	谭婧婧等	35.00	2013.1	2	ppt/pdf
2	居住区景观设计	978-7-301-20587-7	张群成	47.00	2012.5	1	ppt
3	居住区规划设计	978-7-301-21031-4	张　燕	48.00	2012.8	2	ppt
4	园林植物识别与应用	978-7-301-17485-2	潘利等	34.00	2012.9	1	ppt
5	园林工程施工组织管理	978-7-301-22364-2	潘利等	35.00	2013.4	1	ppt/pdf
6	园林景观计算机辅助设计	978-7-301-24500-2	于化强等	48.00	2014.8	1	ppt/pdf
7	建筑·园林·装饰设计初步	978-7-301-24575-0	王金贵	38.00	2014.10	1	ppt/pdf
	房地产类						
1	房地产开发与经营(第 2 版)	978-7-301-23084-8	张建中等	33.00	2014.8	2	ppt/pdf/答案
2	房地产估价(第 2 版)	978-7-301-22945-3	张　勇等	35.00	2014.12	2	ppt/pdf/答案
3	房地产估价理论与实务	978-7-301-19327-3	褚菁晶	35.00	2011.8	2	ppt/pdf/答案
4	物业管理理论与实务	978-7-301-19354-9	裴艳慧	52.00	2011.9	2	ppt/pdf
5	房地产测绘	978-7-301-22747-3	唐春平	29.00	2013.7	1	ppt/pdf
6	房地产营销与策划	978-7-301-18731-9	应佐萍	42.00	2012.8	2	ppt/pdf
7	房地产投资分析与实务	978-7-301-24832-4	高志云	35.00	2014.9	1	ppt/pdf
	市政与路桥类						
1	市政工程计量与计价(第 2 版)	978-7-301-20564-8	郭良娟等	42.00	2015.1	6	pdf/ppt
2	市政工程计价	978-7-301-22117-4	彭以舟等	39.00	2013.2	1	ppt/pdf
3	市政桥梁工程	978-7-301-16688-8	刘　江等	42.00	2012.10	2	ppt/pdf/素材
4	市政工程材料	978-7-301-22452-6	郑晓国	37.00	2013.5	1	ppt/pdf
5	道桥工程材料	978-7-301-21170-0	刘水林等	43.00	2012.9	1	ppt/pdf
6	路基路面工程	978-7-301-19299-3	偶昌宝等	34.00	2011.8	1	ppt/pdf/素材
7	道路工程技术	978-7-301-19363-1	刘　雨等	33.00	2011.12	1	ppt/pdf
8	城市道路设计与施工	978-7-301-21947-8	吴颖峰	39.00	2013.1	1	ppt/pdf
9	建筑给排水工程技术	978-7-301-25224-6	刘　芳等	46.00	2014.12	1	ppt/pdf
10	建筑给水排水工程	978-7-301-20047-6	叶巧云	38.00	2012.2	1	ppt/pdf
11	市政工程测量(含技能训练手册)	978-7-301-20474-0	刘宗波等	41.00	2012.5	1	ppt/pdf
12	公路工程任务承揽与合同管理	978-7-301-21133-5	邱　兰等	30.00	2012.9	1	ppt/pdf/答案
13	★工程地质与土力学(第 2 版)	978-7-301-24479-1	杨仲元	41.00	2014.7	1	ppt/pdf
14	数字测图技术应用教程	978-7-301-20334-7	刘宗波	36.00	2012.8	1	ppt
15	水泵与水泵站技术	978-7-301-22510-3	刘振华	40.00	2013.5	1	ppt/pdf
16	道路工程测量(含技能训练手册)	978-7-301-21967-6	田树涛等	45.00	2013.2	1	ppt/pdf
17	桥梁施工与维护	978-7-301-23834-9	梁　斌	50.00	2014.2	1	ppt/pdf
18	铁路轨道施工与维护	978-7-301-23524-9	梁　斌	36.00	2014.1	1	ppt/pdf
19	铁路轨道构造	978-7-301-23153-1	梁　斌	32.00	2013.10	1	ppt/pdf
	建筑设备类						
1	建筑设备基础知识与识图(第 2 版)	978-7-301-24586-6	靳慧征等	47.00	2014.12	2	ppt/pdf/答案
2	建筑设备识图与施工工艺	978-7-301-19377-8	周业梅	38.00	2011.8	4	ppt/pdf
3	建筑施工机械	978-7-301-19365-5	吴志强	30.00	2014.12	5	pdf/ppt
4	智能建筑环境设备自动化	978-7-301-21090-1	余志强	40.00	2012.8	1	pdf/ppt
5	流体力学及泵与风机	978-7-301-25279-6	王　宁等	35.00	2015.1	1	pdf/ppt/答案

相关教学资源如电子课件、电子教材、习题答案等可以登录 www.pup6.com 下载或在线阅读。

扑六知识网(www.pup6.com)有海量的相关教学资源和电子教材供阅读及下载(包括北京大学出版社第六事业部的相关资源)，同时欢迎您将教学课件、视频、教案、素材、习题、试卷、辅导材料、课改成果、设计作品、论文等教学资源上传到 www.pup6.com，与全国高校师生分享您的教学成就与经验，并可自由设定价格，知识也能创造财富。具体情况请登录网站查询。

如您需要样书用于教学，欢迎登录第六事业部门户网(www.pup6.cn)申请，并可在线登记选题来出版您的大作，也可下载相关表格填写后发到我们的邮箱，我们将及时与您取得联系并做好全方位的服务。

联系方式：010-62756290，010-62750667，yangxinglu@126.com，pup_6@163.com，欢迎来电来信咨询。